

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E**  
**AMBIENTAL**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM RESÍDUO DE**  
**CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) PARA UTILIZAÇÃO**  
**EM PAVIMENTAÇÃO**

**ALEJANDRA MARÍA GÓMEZ JIMÉNEZ**

**ORIENTADOR: MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.DM-196/11**

**BRASÍLIA / DF: SETEMBRO / 2011**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM RESÍDUO DE  
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) PARA UTILIZAÇÃO  
EM PAVIMENTAÇÃO**

**ALEJANDRA MARÍA GÓMEZ JIMÉNEZ**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE**

**APROVADA POR:**

---

**MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD (UnB)  
ORIENTADOR**

---

**JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**LIEDI BARIANI BERNUCCI, DSc (USP)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 05 do SETEMBRO de 2011.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

GÓMEZ, ALEJANDRA MARÍA JIMÉNEZ	
Estudo Experimental de um Resíduo de Construção e Demolição (RCD) Para Utilização Em Pavimentação, Distrito Federal, 2011	
xxv, 123 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2011)	
Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.	
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental	
1. Agregados reciclados	2. Camada de base
3. Quebra de grãos	4. Módulo de resiliência
5. Módulo de deformabilidade	6. Cimentação
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GÓMEZ, A.M. J. (2011). Estudo Experimental de um Resíduo de Construção e Demolição (RCD) Para Utilização Em Pavimentação. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-196/11, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 123 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Alejandra María Gómez-Jiménez

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Estudo Experimental de um Resíduo de Construção e Demolição (RCD) Para Utilização em Pavimentação

GRAU / ANO: Mestre / 2011

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Alejandra María Gómez-Jiménez  
EQN 412/413 Bloco A, Apto (203)  
Edifício Real Park, Asa Norte  
70867405 - Brasília/DF - Brasil

*Ao meu esposo Iván F. por acreditar sempre em mim,  
pela paciência infinita  
e por me fazer rir.*

*Ao meu tio Jairo in memoriam.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus por ter me permitido viver esta maravilhosa experiência e por todas as bênçãos recebidas.

Aos meus pais, Raulito e Amparito pelo amor, apoio, confiança e pela força quando houve momentos difíceis. Obrigada por estar sempre ao meu lado. Os amo muito.

Ao meu irmãozinho “Nito” por ser meu amigo e cúmplice ao longo de minha vida. Por estar todos os dias tão perto apesar dos milhares de quilômetros que nos separam.

À minha família toda por sempre ter-me presente nas suas orações e enviarem energias positivas.

Ao meu orientador, Professor Márcio Muniz de Farias, por acreditar no meu trabalho, pela confiança mostrada permitindo-me co-orientar os trabalhos de graduação. Pelas dicas para a interpretação dos resultados desta pesquisa e claro pelas oportunas correções de Português, acho que melhorei pelo menos um pouco.

Aos senhores Carlos Andrade e Pedro Câmara proprietários da empresa Areia Bela Vista por ter fornecido todo o material desta pesquisa.

Ao professor André Assis, pelas suas orientações para as análises de dados.

Ao grupo de professores do Programa de Pós-graduação em Geotecnia por ter contribuído na minha formação profissional.

Ao Luiz Gustavo de Souza que com o seu trabalho e vontade de aprender fez os dias de laboratório mais agradáveis. Obrigada, alunos como você fazem bons professores.

À professora Edi Mendes Guimarães e ao estagiário Rafael Henrique Grudka Barroso do Instituto de Geociências da UnB, Laboratório de Mineralogia pela ajuda com os ensaios de mineralogia por difração em raios X.

Ao professor Nilson Botero do Instituto de Geociências por facilitar o britador de mandíbulas.

Ao professor Elton L. Dantas do Instituto de Geociências, Laboratório de Geocronologia da UnB, por facilitar o britador e o espaço do laboratório durante os finais de semana.

Ao engenheiro Myller Souza do Instituto de Geociências, Laboratório de Geoquímica da UnB, pela caracterização geoquímica do agregado fino do RCD.

À professora Silvia Dias e a os alunos de mestrado Luciana Borges, Rebeca Almeida e Cleber Filomeno do Instituto de Química, Laboratório de Catálise da UnB pela ajuda com toda a caracterização química do agregado fino de RCD. Foi muito grato conhecer pessoas com tanta vontade de ajudar, muito obrigada mesmo.

À professora Liedi Bernucci e a Rosângela Motta pela colaboração e solução de dúvidas com alguns ensaios realizados durante a pesquisa.

Ao senhor João Moisés, pela ajuda com o trabalho físico.

A minhas colegas de mestrado Caroline Monteiro e Mylane Hortegal pelas revisões de redação deste trabalho.

Aos meus colegas do LER Márcia, Lorena, João, Janaina e Marcus por ter-me ensinado a falar português.

Aos meus amigos Janaína e Marcus por me abrir as portas de sua casa e me acolher como uma irmã. Realmente, me sinto em família com vocês.

Aos meus amigos Juan Fernando Diaz, Jorge Cormane, Claudia Ochoa, Claudia Gómez, Paola Isaza, Ivonne Gutiérrez, Margarita Ochoa, Catalina Mantilla y Esteban Alarcón. Por fazer de nossa vida em Brasília muito mais agradável é muito bom ter um pedacinho de casa por perto.

## RESUMO

A quantidade de resíduos de construção e demolição (RCD) gerada em nível mundial e local é significativa e o incremento de volume é cada vez maior devido a fenômenos como: a construção de novos edifícios e estruturas, que permitem o desenvolvimento das cidades; demolição de edifícios e estruturas que chegaram ao final da sua vida útil; reforma de estruturas para cumprir com novos requisitos ou necessidades; fenômenos naturais como terremotos, tormentas, enchentes e fenômenos antrópicos com as guerras. Na União Européia, são gerados em torno de 300 milhões de ton/ano, nos Estados Unidos são produzidos aproximadamente 170 milhões de ton/ano e no Brasil considerando a geração de 0.4 toneladas de entulho por habitante/dia, são produzidos 68 milhões de ton/ano. O Distrito Federal apresenta uma produção diária de 6000 toneladas por dia equivalentes a uma produção anual de 2.2 milhões de ton/ano. Diferentes pesquisas internacionais e nacionais tem mostrado que é possível reutilizar os RCD em obras de infraestrutura. Nesta pesquisa foi avaliado um resíduo de construção e demolição proveniente da demolição do estádio Mané Garrincha da cidade de Brasília a fim de caracterizá-lo como agregado e verificar suas propriedades físicas, químicas e mecânicas para utilizá-los na construção de bases rodoviárias. Ensaio normalizados tradicionalmente aplicados em agregados naturais foram feitos sobre o agregado reciclado. Os ensaios de compactação nas diferentes energias mostraram que existe uma mudança na composição granulométrica do material, mas, a sua cubicidade permanece. Isso está relacionado com a quantidade de materiais cimentícios que presentes no agregado reciclado avaliado. Os ensaios também permitiram determinar que o teor de água usado na compactação melhora a trabalhabilidade do material. Ensaio de módulo de resiliência mostraram um incremento significativo na rigidez com o tempo de cura. As resistências ao cisalhamento rápido e à compressão simples incrementaram-se ao longo do tempo. De forma geral, os resultados obtidos mostraram que o agregado reciclado de RCD é apto para uso em camadas de base rodoviária e poderia ser considerada a possibilidade da implementação do seu uso não só em vias de baixo volume de tráfego.

## ABSTRACT

The amount of construction and demolition waste (CDW) generated in global and local levels are significant. The volume of these materials are increasing with construction of new buildings, demolition of buildings and structures that have reached the end of its useful life, natural events like earthquakes, storms, floods and antropic events like wars. Around 300 million tons/year of CDW is generated in Europe, in the United States approximately 170 million tons/year and in Brazil 68 million tons are produced per year. The Federal District (Brasilia) has a daily production of 6000 tons per day equivalent to an annual production of 2.2 million tons/year. This research was to assess the CDW from the demolition of the Mane Garrincha Stadium in Brasilia in order to characterize it as an aggregate, and determine its physical, chemical and mechanical properties for use in the construction of road bases. Standard tests applied in natural aggregates were made in recycled aggregate. The grain-size distribution is fairly changed by the compaction process. The particles of CDW recycled aggregate present some breakage during compaction and increases when the energy increase. The compaction test showed that the moisture content does not affect the material workability and only acts as a lubricant between particles.

The resilient modulus showed a significant increase in stiffness of the recycled aggregate after different periods of healing. The shear strength and compressive strength increased to over time. Overall, the results showed that the recycled aggregate RCD is suitable for use in road base layers and could be considered the implementation of its use not only in the process of low traffic volume.

## RESUMEN

La velocidad de la urbanización actual a nivel mundial ha incrementado considerablemente el volumen de residuos de construcción y demolición (RCD). En la Unión Europea son generados cerca de 300 millones de toneladas por año, en los Estados Unidos de Norte América son producidas 170 millones de toneladas por año, en Brasil del orden de 68 millones de toneladas por año. En Brasilia son cerca de 6000 toneladas diarias para una producción anual de 2.2 millones de toneladas por año. Ante la magnitud de la producción de RCD, y el pasivo ambiental que ella conlleva, diferentes investigadores a nivel local, estatal y mundial han trabajado en la caracterización de residuos para darle uso en la industria de la construcción mostrando su viabilidad ambiental, técnica y económica. En este trabajo fue utilizada una única fuente de generación de residuos proveniente de la demolición del Estadio de Brasilia Mané Garrincha para evaluar su uso potencial como material en la construcción de pavimentos. Fue caracterizado el RCD después de pasar por dos procesos de trituración, grueso y fino, llevando a cabo pruebas convencionales de agregados pétreos, análisis químicos y mineralógicos, ensayos estándar para los componentes de la estructura del pavimento como las características de compactación, el índice de soporte de California y el módulo resiliente. De forma general, los materiales estudiados resultaron aptos para la construcción de pavimentos como material de base, cumpliendo con los requisitos mínimos exigidos en las normas brasileras. Otros aspectos del comportamiento del material fueron verificados, como el caso de la influencia del contenido de agua en la compactación que resultó inocua, y el incremento de rigidez con el tiempo de curado como resultado de la presencia residual de materiales puzolánicos.

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1.	MOTIVAÇÃO .....	1
1.2.	RELEVÂNCIA DA PESQUISA .....	4
1.3.	OBJETIVOS.....	4
1.4.	ESCOPO.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1	HISTÓRICO DO USO DE RCD .....	6
2.2	COMPOSIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS RCD .....	8
2.2.1	Composição do RCD.....	8
2.2.2	Classificação dos RCD.....	10
2.3	VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DE RCD.....	11
2.3.1	Vantagens.....	11
2.3.2	Desvantagens.....	12
2.4	NORMATIVAS .....	12
2.5	USO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RCD .....	15
2.6	AVALIAÇÃO DA QUEBRA DOS GRÃOS E DAS PROPRIEDADES CIMENTANTES DOS RCD.....	19
2.6.1	Quebra dos Grãos.....	19
2.6.2	Propriedades Cimentantes .....	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	28
3.1	SELEÇÃO E COLETA DE MATERIAL .....	28
3.1.1	Triagem e Britagem Primária.....	29
3.1.2	Triagem e Britagem Secundária.....	30
3.2	HOMOGENEIZAÇÃO E AMOSTRAGEM .....	32
3.3	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA .....	33
3.3.1	Materiais Constituintes do RCD .....	33
3.3.2	Distribuição Granulométrica do RCD.....	34
3.3.3	Teor de Materiais Pulverulentos .....	35
3.3.4	Limites de Atterberg.....	36
3.3.5	Absorção do Agregado Reciclado De RCD.....	37
3.3.6	Massa Específica e Densidade dos Agregados Graúdos e Miúdos que Compõem o RCD .....	38
3.3.7	Equivalente de Areia .....	40
3.3.8	Índice de Forma.....	41
3.3.9	Durabilidade em Sulfato de Magnésio.....	42
3.3.10	Resistência ao Desgaste por Abrasão Los Angeles.....	42
3.4	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA .....	43
3.4.1	Análise Mineralógica por Difração de Raios X (DRX).....	43
3.4.2	Ensaio de pH .....	45

3.4.3	Análise Química.....	46
3.4.4	Fluorescência de Raios X (FRX).....	46
3.4.5	Análise Elementar (CHN).....	48
3.5	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	48
3.5.1	Seleção da Energia de Compactação.....	49
3.5.2	Ensaio de Compactação em Laboratório.....	49
3.5.3	Índice de Suporte Califórnia (CBR).....	50
3.5.4	Módulo de Resiliência (MR).....	51
3.5.5	Resistência à Compressão não Confinada (RCS).....	56
3.5.6	Determinação de Atividade Pozolânica com Cimento Portland.....	56
3.6	AVALIAÇÃO DA QUEBRA DE GRÃOS DO RCD.....	58
3.7	GANHO DE RESISTÊNCIA POR CIMENTAÇÃO DOS RCD.....	59
4	RESULTADOS E ANÁLISES.....	60
4.1	MATERIAIS CONSTITUINTES DO RCD.....	60
4.2	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO RCD.....	62
4.3	LIMITES DE ATTERBERG.....	63
4.4	EQUIVALENTE DE AREIA (EA).....	64
4.5	ABSORÇÃO DO AGREGADO RECICLADO DE RCD.....	65
4.6	MASSA ESPECÍFICA E DENSIDADE DOS AGREGADOS GRAÚDOS E MIÚDOS QUE COMPÕEM O RCD.....	66
4.7	ÍNDICE DE FORMA.....	66
4.8	DURABILIDADE EM SULFATO DE MAGNÉSIO.....	67
4.9	RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR ABRASÃO LOS ANGELES.....	68
4.10	ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX).....	69
4.11	ANÁLISE GEOQUÍMICA.....	70
4.12	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX).....	71
4.13	ANÁLISE ELEMENTAR CHN.....	72
4.14	ENSAIO DE PH.....	72
4.15	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO EM LABORATÓRIO.....	73
4.15.1	Compactação com energia Proctor normal.....	74
4.15.2	Compactação com energia Proctor intermediária.....	76
4.15.3	Compactação com energia Proctor modificada.....	77
4.16	ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (CBR).....	80
4.17	MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR).....	86
4.17.1	Ensaio Triaxial Cíclico e Obtenção de Módulos de Resiliência.....	86
4.17.2	Ensaio de Cisalhamento Rápido.....	92
4.18	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA.....	96
4.19	DETERMINAÇÃO DE ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CIMENTO PORTLAND.....	97

4.20	AVALIAÇÃO DA QUEBRA DOS GRÃOS .....	98
4.20.1	Quebra de grãos variando a energia de compactação .....	98
4.20.2	Quebra de grãos após ensaio CBR .....	103
4.20.3	Quebra de grãos após ensaio de módulo de resiliência .....	104
4.21	GANHO DE RESISTÊNCIA POR CIMENTAÇÃO DOS RCD .....	108
4.21.1	Ensaio de módulo de resiliência .....	108
4.21.2	Ensaio de compressão não confinada .....	111
5.	CONCLUSÕES .....	113

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1–1. Quantidade estimada de RCD produzido nos Estados Unidos durante 2003 (modificado de EPA, 2003).....	2
Tabela 2–1. Relação entre produção de RCD e sua reciclagem (modificado de Tam <i>et.al</i> , 2008).....	7
Tabela 2–2. Materiais típicos que compõem os RCD nos Estados Unidos (Modificado de EPA, 2003).....	9
Tabela 2–3. Valores de CBR reportados por Leite, (2006).....	27
Tabela 3–1. Especificações técnicas do Britador C 80/50 .....	30
Tabela 3–2. Especificações técnicas do britador de mandíbulas do laboratório de Geocronologia.....	31
Tabela 3–3. Faixas granulométricas para base estabilizada granulometricamente (DNER-ES 303/97) .....	35
Tabela 3–4. Massa mínima requerida para a determinação de material pulverulento .....	35
Tabela 3–5. Determinação da graduação do material após análise granulométrica (DNER-ME 086/94) .....	41
Tabela 3–6. Frações e pesos de RCD para o teste de durabilidade em Sulfato de Magnésio..	42
Tabela 3–7. Definição das condições iniciais para o ensaio Los Angeles sobre RCD .....	43
Tabela 3–8. Características do ensaio de compactação.....	50
Tabela 3–9. Compactação dos corpos de prova para ensaio CBR com RCD .....	51
Tabela 3–10. Generalidades do RCD utilizado para os ensaios de módulo de resiliência .....	54
Tabela 3–11. Sequência de carregamentos para materiais de base e sub-base (AASHTO T307-99).....	55
Tabela 3–12. Exigências químicas para materiais puzolânicos (NBR 12653/92) .....	57
Tabela 3–13. Exigências físicas para materiais puzolânicos (NBR 12653/92).....	57
Tabela 4–1. Classificação do RCD segundo NBR 15116/04.....	62
Tabela 4–2. Classificação textural do RCD .....	63
Tabela 4–3. Resultado obtido no ensaio de limite de liquidez.....	64
Tabela 4–4. Resultado obtido em ensaios de EA para o RCD.....	65
Tabela 4–5. Teores de absorção encontrados em diferentes pesquisas com RCD.....	65
Tabela 4–6. Densidade e massa específica do RCD .....	66
Tabela 4–7. Resultado para a fração graúda de RCD no ensaio de durabilidade em sulfato de magnésio.....	67
Tabela 4–8. Resultado para a fração fina de RCD no ensaio de durabilidade em sulfato de magnésio.....	68
Tabela 4–9. Ensaio de desgaste por abrasão Los Angeles em RCD .....	68
Tabela 4–10 Óxidos encontrados no agregado de RCD miúdo .....	71
Tabela 4–11 Análise química quantitativa por FRX.....	71

Tabela 4–12. Ensaio de pH sobre RCD.....	73
Tabela 4–13. Índices de vazios interagregados e totais para diferentes energias de compactação .....	75
Tabela 4–14. Resultado da análise de variância simples (ANOVA) para a energia normal....	75
Tabela 4–15. Resultado da análise de variância simples (ANOVA) para a energia intermediária.....	77
Tabela 4–16. Resultado da análise de variância simples (ANOVA) para a energia modificada .....	78
Tabela 4–17. Pesos específicos aparentes do RCD em diferentes estados .....	79
Tabela 4–18. Resultado da análise de variância simples (ANOVA) considerando diferentes energias.....	79
Tabela 4–19. Umidade ótima e peso específico aparente seco máximo em diferentes agregados reciclados de RCD .....	80
Tabela 4–20. Valores de CBR sem imersão.....	81
Tabela 4–21. Valores de CBR com imersão e medida de expansão .....	82
Tabela 4–22. Resultado da análise de variância (ANOVA) para o CBR com e sem imersão.	83
Tabela 4–23. Comparação dos resultados das misturas contendo agregado reciclado graúdo (Carneiro <i>et al.</i> , 2001) .....	84
Tabela 4–24. Valores de CBR obtidos nas dosagens de agregados reciclados (Oliveira, 2005) .....	85
Tabela 4–25. Valores de CBR para agregados reciclados (Leite, 2006).....	85
Tabela 4–26. Verificação do teor de umidade antes compactação e após tempo de cura.....	87
Tabela 4–27. Valores médios dos teores de umidade dos corpos de prova para MR .....	88
Tabela 4–28. Coeficientes de regressão .....	89
Tabela 4–29. Módulos de resiliência para diferentes energias de compactação .....	91
Tabela 4–30. Mudança do módulo de resiliência devido a quebra das partículas. Tensão desvio 50 kPa (Zeghal, 2009).....	92
Tabela 4–31. Resultados obtidos do ensaio triaxial rápido .....	93
Tabela 4–32. Ângulos de atrito calculados para o agregado reciclado de RCD avaliado.....	95
Tabela 4–33. Índice de atividade pozolânica .....	97
Tabela 4–34. Comparação entre o RCD avaliado e os valores da norma NBR 12653/92.....	98
Tabela 4–35. Índices de quebra com variação do teor de umidade, energia Proctor Normal..	99
Tabela 4–36. Índices de quebra com variação do teor de umidade, energia Proctor Intermediária .....	100
Tabela 4–37. Índices de quebra com variação do teor de umidade, energia Proctor Modificada .....	100
Tabela 4–38. Índices de quebra obtidos para diferentes energias de compactação .....	102

Tabela 4–39. Índices de quebra ( $ID_p$ ) obtidos para o ensaio CBR nas diferentes energias de compactação .....	104
Tabela 4–40. Índices de quebra ( $B_g$ ) obtidos para o ensaio CBR nas diferentes energias de compactação .....	104
Tabela 4–41. Índices de quebra obtidos para o ensaio de módulo de resiliência.....	105
Tabela 4–42. Resultado da ANOVA para índice de quebra considerando diferentes ensaios .....	106
Tabela 4–43. Valores de $B_g$ encontrados por Marsal (1975) sobre agregados naturais .....	107
Tabela 4–44. Normalização dos valores de módulo de deformabilidade (D).....	109
Tabela 4–45. Normalização dos valores de resistência à compressão simples.....	111
Tabela 4–46. Comparação entre valores de referência para agregados usados na pavimentação e o RCD analisado.....	112

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Diferentes usos de materiais reciclados em pavimentação (Petkovic, 2004).....	16
Figura 2-2. Montagem geral do ensaio e detalhe do aterro com RCD (Góngora, 2011). ....	18
Figura 2-3. Muros 1 e 2 construídos com RCD como material de aterro (Santos, 2011).....	18
Figura 2-4. Avaliação da quebra dos grãos (Lee & Farhoodmand, 1967).....	20
Figura 2-5. Mudança na distribuição granulométrica produzida pela rotura dos grãos (Marsal, 1975).....	21
Figura 2-6. Representação gráfica da variação dos pesos inicial e final pelo método de Marsal, (1975) .....	21
Figura 2-7. Mudança na distribuição granulométrica produzida pela quebra dos grãos: a) definição de quebra potencial; b) definição de quebra total; c) relação entre quebra total e quebra potencial (Hardin, 1985).....	22
Figura 2-8. Mudança na distribuição granulométrica produzida pela rotura dos grãos (Lade <i>et al.</i> , 1996) .....	23
Figura 2-9. Mudança na graduação com o processo de compactação (Zeghal, 2009).....	24
Figura 2-10. Aumento do módulo de resiliência segundo o tempo de cura (Arm, 2001).....	26
Figura 2-11. Resistência à compressão de amostras com diferentes frações de finos (Poon <i>et al.</i> , 2006) .....	26
Figura 3-1. Entulho gerado pela demolição do Estádio Mané Garrincha. Pátio de armazenamento empresa Areia Bela Vista.....	29
Figura 3-2. Britador de mandíbulas empresa Areia Bela Vista.....	29
Figura 3-3. RCD após do primeiro processo de britagem.....	30
Figura 3-4. Triagem de materiais contaminantes: a) madeira, b) plásticos, c) ferro.....	31
Figura 3-5. RCD após do segundo processo de britagem. a) amostra laboratório de Geocronologia; b) amostra laboratório de Geociências. ....	31
Figura 3-6. Distribuição granulométrica do RCD após da britagem no laboratório de Geocronologia.....	32
Figura 3-7. Processo de britagem secundário.....	32
Figura 3-8. Processo de armazenamento e secagem do RCD.....	33
Figura 3-9. Limites de Atterberg. Modificado de (Das, 2006) .....	36
Figura 3-10. Equipamento: cone de penetração para o ensaio de limite de liquidez.....	37
Figura 3-11. Ensaio de absorção e densidade aparente do agregado graúdo de RCD: a) etapa de saturação 24 h; b) massa saturada superficialmente seca e c) massa saturada submersa....	38
Figura 3-12. Ensaio de densidade real dos grãos de RCD .....	39
Figura 3-13. Etapas do ensaio de equivalente de areia: a) inserção do material na solução; b) equipamento misturador; c) enchimento de frasco com solução; d) leitura da fração argila...	40
Figura 3-14. Equipamento utilizado para a determinação do índice de forma .....	42
Figura 3-15. Ensaio de abrasão Los Angeles: a) equipamento; b) RCD após do ensaio.....	43

Figura 3-16. Geometria da equação de Bragg (Guimarães, 1999).....	44
Figura 3-17. Preparação de amostras de RCD para ensaio de DRX: a) trituração da amostra; b) montagem em placa de vidro; c) amostra dentro do difratômetro .....	45
Figura 3-18. Tratamento das amostras em pó para análise por XRF/EDX em condição de vácuo: (a) base em polipropileno (PP); (b) material preenchendo recipiente; (c) cobertura do recipiente filme de PP, vedando-o com anel de plástico (d) furo para aplicar vácuo (Borges, 2011).....	48
Figura 3-19. Compactador mecânico e corpo de prova de RCD após compactação Proctor ..	49
Figura 3-20. Equipamento usado na penetração do ensaio CBR sobre RCD .....	50
Figura 3-21. Molde tripartido e corpo de prova usado na realização de ensaios de módulo de resiliência .....	54
Figura 3-22. Prensa de compressão triaxial cíclica. Laboratório de Engenharia Rodoviária (LER).....	55
Figura 3-23. Prensa de compressão CBR e Marshal utilizada no ensaio de compressão simples .....	56
Figura 3-24. Procedimento de armazenagem e cura dos corpos de prova de RCD .....	59
Figura 4-1. Composição da amostra total utilizada na pesquisa .....	60
Figura 4-2. Materiais que compõem o RCD segundo a sua natureza .....	61
Figura 4-3. Curva granulométrica do agregado de RCD .....	62
Figura 4-4. Composição textural do RCD.....	63
Figura 4-5. Ensaio de limite de liquidez por cone de penetração .....	64
Figura 4-6. Difratoograma obtido sobre a amostra RCD1 .....	69
Figura 4-7. Difratoograma obtido sobre amostra RCD2.....	70
Figura 4-8. Difratoograma obtido sobre amostra RCD3 .....	70
Figura 4-9. Dados obtidos durante o ensaio de pH para o RCD .....	72
Figura 4-10. Curvas de compactação obtidas para energia normal.....	74
Figura 4-11. Curvas de compactação obtidas para energia intermediária.....	76
Figura 4-12. Curvas de compactação obtidas para energia modificada.....	78
Figura 4-13. Curvas tensão penetração para CBR com diferentes energia de compactação, sem imersão .....	81
Figura 4-14. Curvas tensão penetração para CBR com diferentes energias de compactação, com imersão .....	83
Figura 4-15. Valores CBR para energia intermediária: a) sem imersão b) com imersão .....	84
Figura 4-16. Variabilidade dos valores de módulo de resiliência ao longo do tempo .....	87
Figura 4-17. Variação do módulo de resiliência com a tensão confinante, após compactação .....	88
Figura 4-18. Variação do MR do Triaxial Cíclico vs. Modelo Universal.....	90
Figura 4-19. Variação do MR do Triaxial Cíclico vs. Modelo Misto ao longo do tempo .....	90

Figura 4-20. Resultados de módulo de resiliência do agregado reciclado de RCD com diferentes energias de compactação .....	91
Figura 4-21. Curva tensão-deformação, obtida após ensaio triaxial cíclico, 30 dias de cura. Tensão confinante $\sigma_3=34.5$ kPa .....	93
Figura 4-22. Variação do Módulo de Deformabilidade com o tempo de cura.....	94
Figura 4-23. Trajetória de tensões calculada em termos de t e s, 30 dias de cura.....	95
Figura 4-24. Variação da resistência à compressão não confinada ao longo do tempo.....	96
Figura 4-25. Processo de aparição de trincas longitudinais durante ensaio de compressão simples.....	97
Figura 4-26. Variação da curva granulométrica com o teor de umidade, usando Proctor Normal.....	99
Figura 4-27. Variação da curva granulométrica com o teor de umidade, usando Proctor Intermediário .....	99
Figura 4-28. Variação da curva granulométrica com o teor de umidade usando Proctor Modificado .....	100
Figura 4-29. Efeito da energia de compactação na curva granulométrica .....	101
Figura 4-30. Quantificação da quebra dos grãos.....	102
Figura 4-31. Curvas granulométricas obtidas após ensaio CBR com imersão .....	103
Figura 4-32. Curvas granulométricas obtidas após ensaio de módulo de resiliência.....	105
Figura 4-33. Variação das curvas granulométricas após ensaios de compactação, CBR e módulo.....	107
Figura 4-34. Variação do módulo de resiliência ao longo do tempo .....	108
Figura 4-35. Variação da resistência ao cisalhamento com o tempo de cura.....	109
Figura 4-36. Variação do módulo de deformabilidade normalizado ( $D/D_{ref}$ ) com o tempo de cura.....	110
Figura 4-37. Incremento na rigidez de um ARC, ensaios de campo e laboratório (Arm, 2001) .....	110
Figura 4-38. Variação da resistência à compressão não confinada em função do tempo de cura .....	112

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIações

$a$	Absorção
$a^*$	Intercepto da linha Kf com relação ao eixo t
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	Alumínio
AlO <sub>2</sub>	Dióxido de alumínio
ANOVA	Análise de variância simples
ARC	Agregado de resíduo de concreto
ARM	Agregado de resíduo misto
ASCOLES	Associação das Empresas Coletoras de Entulho e Similares do DF
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
B	Índice de quebra de grãos (Lee & Farhoodmand, 1967)
B <sub>10</sub>	Índice de quebra no diâmetro efetivo (Lade, 1996)
B <sub>g</sub>	Índice de quebra de grãos (Marsal, 1975)
B <sub>p</sub>	Índice de quebra parcial dos grãos (Hardin, 1985)
B <sub>r</sub>	Quebra relativa dos grãos (Hardin, 1985)
BS	<i>British Standard</i>
B <sub>t</sub>	Índice de quebra total dos grãos (Hardin, 1985)
c	Coesão
Ca	Cálcio
CAH	Aluminatos de cálcio hidratados
CaO	Óxido de cálcio
CAP	Concreto asfáltico de petróleo
CBR	Índice de Suporte Califórnia
Cc	Coefficiente de curvatura

CEASA	Centrais de Abastecimento de Goiás S/A
cm	Centímetro
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
CO <sub>2</sub>	Gás carbônico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CSAH	Sílico-aluminatos de cálcio hidratados
CSH	Silicatos de cálcio hidratados
Cu	Cobre
<i>Cu</i>	Coefficiente de uniformidade
<i>D*</i>	Diâmetro de partícula
D	Módulo de deformabilidade
d	Dias
<i>d</i>	Distância interplanar de um dado plano do cristal
D <sub>10</sub>	Diâmetro efetivo
D <sub>15</sub>	Diâmetro correspondente à 15% de finos da curva granulométrica
D <sub>25</sub>	Densidade real do agregado miúdo, a 25°C (temperatura do ensaio e da água)
D <sub>ap</sub>	Densidade aparente
DF	Distrito federal
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difração de raios X
<i>e</i>	Afastamento mínimo entre dois planos paralelos entre os quais pode ficar retido o grão
<i>e</i>	Índice de vazios
EA	Equivalente de areia
<i>e</i> <sub>min</sub>	Índice de vazios mínimo
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>

ESR	Estruturas de solo reforçado
<i>et al.</i>	E outros
f	Índice de forma
Fe	Ferro
g	Gramma
FRX	Fluorescência de raios X
G1	Materiais cimentícios
G2	Materiais pétreos
G3	Materiais cerâmicos
G4	Materiais contaminantes
gl	Graus de liberdade
Gs	Densidade das partículas sólidas
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Ácido bórico
HCl	Ácido clorídrico
Hz	Hertz
ID <sub>p</sub>	Índice de degradação por compactação Proctor
IP	Índice de plasticidade
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
K	Potássio
k <sub>1</sub>	Coefficiente de regressão dependente da rigidez do material
k <sub>2</sub>	Coefficiente de não linearidade dependente da tensão de confinamento
k <sub>3</sub>	Coefficiente de não linearidade dependente da tensão desvio
KCl	Cloreto de potássio
kg	Quilograma
kgf	Quilograma força
kN	Quilo Newton
kPa	Quilo Pascal

kw	Quilowatt
L	Leitura no frasco Chapman
l	Litros
LAB-CAT	Laboratório de catálise da Universidade de Brasília
LD	Limite de detecção do aparelho
LER	Laboratório de Engenharia Rodoviária
LiBO <sub>2</sub>	Metaborato de lítio
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
LQ	Limite de quantificação do método
m	Metro
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
Mg	Magnésio
mg	Miligrama
min	Minuto
ml	Mililitros
mm	Milímetros
mm/min	Milímetros por minuto
MIT	Instituto Técnico de Massachusets
MPa	Mega Pascal
MQ	Média dos quadrados
MR	Módulo de Resiliência
M <sub>s</sub>	Massa, ao ar, do agregado seco em estufa
M <sub>SSS</sub>	Massa, ao ar do agregado na condição saturada superfície seca
M <sub>sub</sub>	Massa submersa do agregado
N	Newton
n	Ordem de reflexão

Na	Sódio
NBR	Norma Brasileira
NP	Não plástico
Pa	Pascal
$p_a$	Pressão atmosférica
PD	Deformação permanente
PET	Polietileno tereftalato
pH	Potencial hidrogeniônico
PMSP	Prefeitura do Município de São Paulo
PP	Polipropileno
PVC	Poli cloreto de vinila
$q_u$	Resistência não-drenada
RAW	<i>Standard Road Specifications</i>
RCA	<i>Recycled concrete aggregate</i>
RCD	Resíduo de construção e demolição
RCS	Resistência à compressão simples
rpm	Revoluções por minuto
RSU	Resíduos sólidos urbanos
s	Segundos
Si	Sílica
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de sílica
SLU	Serviço de limpeza urbana
SQ	Soma dos quadrados
TP	Teor de material pulverulento
ton/ano	Toneladas por ano
TTT	Trajectoria de tensões totais
U	Uranio

U\$	Dólares americanos
UnB	Universidade de Brasília
UNI	Unificação Nacional de Normas Italiana
US	<i>United States</i>
$W_{kf}$	Peso final da amostra expressado em porcentagem da amostra total
$W_{ki}$	Peso inicial da amostra expressado em porcentagem da amostra total
XRD	<i>X ray diffraction</i>
XRF/EDX	<i>Energy-dispersive X-ray fluroescence</i>
$\varepsilon_1$	Deformação axial resiliente
$\Sigma$	Somatória
$\theta'$	Ângulo de incidência da onda com o plano
$\theta$	Primeiro invariante de tensão ou tensão volumétrica
$\lambda^*$	Maior dimensão do grão entre dois planos paralelos
$\lambda$	Comprimento de onda
$\rho$	Massa específica real do agregado miúdo
$\sigma_1$	Tensão principal maior ou tensão axial
$\sigma_3$	Tensão principal menor ou tensão confinante
$\sigma_{ciclica}$	Tensão cíclica
$\sigma_d$	Tensão de desvio
$\sigma_{dmax}$	Tensão de desvio máxima
$\tau_{oct}$	Tensão octaédrica
$\Delta W_k$	Diferença entre os pesos retidos em duas peneiras
$\alpha$	Ângulo de inclinação da linha Kf
$\phi$	Ângulo de atrito
$\gamma_d$	Peso específico aparente seco
$\gamma_{dmax}$	Peso específico aparente seco máximo

$\omega$	Teor de umidade
$\omega_{ot}$	Teor de umidade ótica
%	Porcentagem
$\leq$	Menor ou igual que
$\geq$	Maior ou igual que
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1. MOTIVAÇÃO

A proteção do meio ambiente é um fator básico que está ligado à sobrevivência da raça humana. Temas como consciência ambiental, proteção dos recursos humanos e desenvolvimento sustentável desempenham um importante papel nos requerimentos modernos para os projetos de construção (Oikonomou, 2005).

Oikonomou (2005) ressalta que os materiais de construção são muito significativos em nossas vidas considerando que em 90% do tempo estamos dentro de edifícios ou infra-estruturas (rodovias, estradas, pontes, barragens, etc.). Isso faz com que a construção seja responsável por utilizar pelo menos 50% de materiais primários da natureza, o consumo de 40% da energia total produzida e a produção de 50% do lixo das cidades.

A construção civil é reconhecida como uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento de qualquer país, porém, é uma grande geradora de impactos ambientais devido ao intenso consumo de matéria prima, à modificação da paisagem e à grande geração de resíduos (Delongui *et al.*, 2010). A indústria da construção civil, em função das características particulares do seu processo produtivo, constitui-se em uma grande geradora de resíduos denominados resíduos de construção e demolição (RCD). Esse resíduo consiste em produção de entulho gerado durante a construção, renovação e demolição de edifícios, estradas e pontes. O RCD é composto por materiais volumosos e pesados, como concreto, cerâmicos, madeira, plásticos, metais e vidro, entre outros.

Nos países subdesenvolvidos e em vias de desenvolvimento, esses resíduos geralmente não têm um tratamento ou disposição final adequado sendo levados, no melhor dos casos, para aterros sanitários onde devido a seu grande volume diminuem consideravelmente a vida útil desses locais. Em outros casos são simplesmente colocados em bota-foras ilegais onde o material vai-se acumulando por vários anos ou mesmo décadas até formar terrenos artificiais aparentemente estáveis que geralmente viram assentamentos humanos. O acúmulo desse tipo de resíduos em encostas favorece os movimentos de massa como os que aconteceram em Niterói, estado de Rio de Janeiro, em abril de 2010, ou no município de Bello, Colômbia, em dezembro de 2010, onde após fortes chuvas ocorreram escorregamentos classificados como fluxos de detritos e lodos. Os dois deslizamentos deixaram 100 pessoas mortas e foi comprovado, em ambos os casos, a existência prévia de bota-foras de resíduos de construção

e outros materiais antrópicos. Esses fenômenos geram grande preocupação entre autoridades governamentais e ambientais.

A quantidade de RCD gerada em nível mundial e local é significativa e o incremento de volume é cada vez maior devido à construção de novos edifícios e estruturas, que permitam o desenvolvimento das cidades; demolição de edifícios e estruturas que chegaram ao final da sua vida útil; reforma de estruturas para cumprir com novos requisitos ou necessidades; fenômenos naturais como terremotos, tormentas, enchentes e fenômenos antrópicos com as guerras.

Na União Européia, são gerados em torno de 300 milhões de ton/ano. Segundo a *Environmental Protection Agency* dos Estados Unidos (EPA), em 2003, a produção de RCD chegou a um total de 170 milhões de toneladas provenientes das diferentes fontes ou atividades da construção como apresentado na Tabela 1–1. Em Hong Kong a produção de resíduos era de 19,6 ton/ano em 2004. Segundo Tam *et al.* (2008), na Austrália a produção de RCD é o 44% dos resíduos sólidos urbanos (RSU) o que equivale a seis milhões de ton/ano. No Brasil, considerando a geração de 0.4 toneladas de entulho por habitante/dia, seriam produzidos 68 milhões de ton/ano. Somente na cidade de São Paulo, são gerados seis milhões de ton/ano (Kazmierczak, 2008). A estimativa da Associação das Empresas de Coletores de Entulho de Obra e Similares de Brasília (ASCOLES) é que 70% dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados no DF são constituídos por RCD, com uma carga de 6000 toneladas por dia o que equivale a 2.2 milhões de toneladas por ano (Farias, 2009), considerando apenas resíduos coletados pelo Serviço de Limpeza Urbana (SLU).

**Tabela 1–1.** Quantidade estimada de RCD produzido nos Estados Unidos durante 2003 (modificado de EPA, 2003)

Fonte	Residencial		Não Residencial		Total	
	Milhões de toneladas	Porcentagem (%)	Milhões de toneladas	Porcentagem (%)	Milhões de toneladas	Porcentagem (%)
<b>Construção</b>	10	15	5	5	15	9
<b>Renovação</b>	38	57	33	32	71	42
<b>Demolição</b>	19	28	65	63	84	49
<b>Total</b>	67	100	103	100	170	100
<b>Porcentagem (%)</b>		39		61		100

A quantidade de resíduos gerados varia consideravelmente de uma comunidade para outra. Essa variação é originada em parte pelas diferentes técnicas de construção e o crescimento histórico e econômico da comunidade. Em zonas de crescimento rápido, o fluxo

de resíduos RCD decorre principalmente de materiais de construção de novos edifícios, geralmente com pequenas quantidades de material de demolição. Grandes volumes de resíduos de demolição são gerados quando edifícios antigos são derrubados completa ou parcialmente. Os materiais que compõem os RCD também variam conforme o tipo de edificação e os métodos empregados na indústria da construção (EPA, 2003).

Além da preocupação com a geração de RCD, existe o fato de que a exploração indiscriminada dos recursos naturais provocou a escassez desses e uma rápida deterioração do entorno e das jazidas, obrigando a exploração de novas fontes de materiais. No Brasil, a região do Distrito Federal é conhecida nacionalmente pela carência de materiais adequados para a estrutura do pavimento. As jazidas de cascalho, tradicionalmente utilizadas como material de base rodoviária, encontram-se hoje em fase de exaustão. Há também insuficiência de britas de qualidade que possam ser utilizadas como agregados para as camadas de base, sub-base ou para as misturas asfálticas dos revestimentos (Farias, 2009).

Pesquisas desenvolvidas em países como Holanda, Hong Kong, Espanha, Alemanha, Estados Unidos e Brasil indicam que os resíduos de construção civil e demolição apresentam potencialidades na substituição de agregados usados para concreto e pavimentação, considerando que em seu primeiro uso foram selecionados como matéria prima essencial desses produtos, e ainda conservam muitas das suas propriedades originais. Então os agregados reciclados poderiam ocupar o lugar das britas graduadas e de areias de diferentes tamanhos, entre outros.

Dentro dessas perspectivas e tendo-se em conta a capacidade instalada da Universidade de Brasília (UnB) em termos de recursos físicos e humanos, esta pesquisa foi desenvolvida, abordando a possibilidade de re-uso dos RCD produzidos em Brasília como materiais convenientes para utilização em pavimentação. Para isso, foi necessário separar e classificar o resíduo, com o intuito de que cada leva de material obtida fosse adequada a uma faixa granulométrica normalizada, possibilitando uma comparação entre os materiais alternativos e os naturais atualmente usados, determinando as propriedades químicas, físicas e mecânicas a fim de obter-se informações sobre sua composição e estabilidade química; tamanho, forma e distribuição das partículas e seu comportamento mecânico quando for submetido a carregamentos cíclicos.

## **1.2. RELEVÂNCIA DA PESQUISA**

É importante ressaltar que, o crescimento desordenado das cidades com o aparecimento de diversos núcleos de assentamentos reflete diretamente em questões ambientais e sociais, uma vez que nem sempre essas novas comunidades contam com infraestrutura mínima em todos os setores, e ausência de serviços de pavimentação adequados (Farias, 2009). Todos esses fatores conjuntos apontam naturalmente para a busca de alternativas de reciclagem desses materiais, pois a disposição dos resíduos sólidos gera obviamente sérias preocupações do ponto de vista ambiental e social.

Por isso, a pesquisa que se apresenta tem grande relevância uma vez que a obtenção de materiais alternativos teria influência em dois aspectos: o primeiro de caráter ambiental visando a resolver o problema de escassez de matérias primas e de disposição dos resíduos sólidos e o segundo de caráter econômico, uma vez que o material reciclado é mais barato e seu uso reduz os gastos municipais com despejos irregulares de rejeito (BIO, 2004; Leite, 2007). Uma vez avaliado o comportamento físico e mecânico dos RCD do DF, se teria uma base sólida para a efetiva promoção do resíduo triturado como material adequado para uso na estrutura de pavimentos, o qual ainda sofre preconceitos.

## **1.3. OBJETIVOS**

Esta pesquisa tem como objetivo geral verificar a aplicabilidade de um resíduo de construção civil e demolição na estrutura de pavimentos.

Para atender a esse objetivo, serão desenvolvidos os seguintes passos específicos:

- Caracterização física e química do resíduo de construção civil e demolição mediante os ensaios tradicionais empregados para agregados naturais;
- Análise da influência do processo de compactação na variação de tamanho, distribuição e forma das partículas;
- Avaliação do comportamento mecânico do resíduo de construção e demolição, submetido a diferentes períodos de cura.

## **1.4. ESCOPO**

O presente trabalho está dividido em seis capítulos. O primeiro trata de uma INTRODUÇÃO onde se apresenta a motivação da pesquisa, os objetivos estabelecidos para o desenvolvimento da pesquisa e a sua organização. O segundo capítulo é a REVISÃO BIBLIOGRÁFICA em

que se aborda o tema dos resíduos de construção através da história, passando pela definição de sua composição e classificação, considerando normativas e diferentes tipos de usos a que esses materiais têm dentro da indústria da construção civil. O capítulo 3 com o título MATERIAIS E MÉTODOS, relata detalhadamente a pesquisa com o agregado reciclado de Brasília, desde a coleta do material até sua caracterização física, química e mecânica por meio de métodos laboratoriais normalizados. No capítulo 4, RESULTADOS E ANÁLISES, se apresentam de forma detalhada todos os resultados dos ensaios e se avalia o comportamento do material com relação ao seu comportamento ao longo do tempo. O capítulo 5, CONCLUSÕES, apresenta os resultados mais relevantes da pesquisa e inclui considerações sobre tópicos que não foram abrangidos durante o estudo e que poderiam contribuir para o melhor entendimento do RCD.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 HISTÓRICO DO USO DE RCD

Reutilização e reciclagem de materiais não são procedimentos novos. Rejeitos de materiais, como metais, madeira e papel, têm sido reutilizados desde tempos imemoriáveis. *Opus caementitium* (comparável ao concreto), feito de pedra triturada, era comumente utilizado nos tempos romanos. A estrutura de concreto usada para transportar água de Eifel para a Colônia continha uma liga feita com cal, pó de tijolos quebrados e outras substâncias pozolânicas (Hendriks *et al.*, 2007).

Hendriks *et al.* (2007) fazem referência ao uso de resíduos de diferentes materiais em diversas atividades, por exemplo, na Suécia um forno de rocha de escória de aço que data de 1874. Na Holanda os resíduos de materiais começaram a ser usados em 1920. Depois da Segunda Guerra Mundial, escombros foram empregados como materiais básicos e como agregado para concreto e asfalto. Na década de 1950, o asfalto triturado era reutilizado em recuperação de asfalto depois da adição de um agente rejuvenescedor. Na década de 1970 pesquisas sobre o reuso de concreto asfáltico foram desenvolvidas devido à crise do petróleo. Outras pesquisas sobre a utilização de diferentes tipos de resíduos foram desenvolvidas nessa década, pois a deposição e a incineração do lixo provocou protestos por causa do espaço ocupado e do risco de contaminação do solo, fontes de água superficiais e subterrâneas e do ar. Assim, em 1979, surgiu como parte da legislação holandesa *The Waste Material Act* (Hendriks *et al.*, 2007).

Na Europa, o processo de reciclagem dos resíduos de construção e demolição teve seu maior desenvolvimento no começo de 1980 quando Holanda começou seu programa de reciclagem associado à falta de espaço nos aterros sanitários para esses materiais e a evidente diminuição dos agregados minerais do país. Por outro lado, a Noruega não é um grande reciclador, pois, ao contrário de outros países europeus, tem abundantes recursos minerais, com uma produção de agregados graúdos e rocha britada equivalente a 50 milhões de toneladas ano. Dessa quantidade entre 10% e 20% é reciclada, por isso a administração começou o programa de reciclagem de RCD em 2002. Além desses resíduos, o programa inclui pneus triturados e vidro celular empregados como materiais de enchimento leve. O objetivo do programa de reciclagem visa dar alta prioridade a possíveis problemas ambientais (Petkovic *et al.*, 2004).

Segundo Tam *et al.* (2008), os RCD constituem uma grande proporção de resíduos sólidos. No Reino Unido, mais de 50% do lixo disposto em aterros sanitários são RCD, chegando a 70 milhões de toneladas por ano. Na Austrália, aproximadamente 14 milhões de toneladas de lixo são dispostos nos aterros sanitários cada ano e pelo menos 44% deles correspondem a RCD. Nos Estados Unidos, 29% dos resíduos sólidos pertencem aos resíduos de construção, e em Hong Kong esse valor chega a 38%. Na Tabela 2–1 apresenta-se uma relação entre os resíduos de construção gerados em diferentes países e a reciclagem desses materiais.

**Tabela 2–1.** Relação entre produção de RCD e sua reciclagem (modificado de Tam *et.al*, 2008).

<b>Pais</b>	<b>RCD / Total de Lixo (%)</b>	<b>Reciclagem RCD (%)</b>
Alemanha	19	40 – 60
Austrália	44	51
Brasil	15	8
Dinamarca	25 – 50	80
Espanha	70	17
Estados Unidos	29	25
Finlândia	14	40
França	25	20 – 30
Holanda	26	75
Hong Kong	38	Sem informação
Japão	36	65
Itália	30	10
Noruega	30	7
Reino Unido	>50	40

Nas últimas duas décadas a exploração dos recursos naturais visando à construção, tem se tornado uma grande preocupação devido ao impacto ambiental envolvido, uma vez que os materiais extraídos não são renováveis, e parte deles são resíduos que chegam sem controle aos aterros sanitários. Por isso diversas pesquisas têm se desenvolvido com o intuito de analisar as propriedades físicas e mecânicas dos RCD, resultando na possibilidade de reciclagem desses resíduos.

John (2000) considera que a reciclagem destes resíduos deveria envolver os seguintes elementos metodológicos:

- Caracterização física e química e da microestrutura do resíduo, incluindo o seu risco ambiental;
- Busca de possíveis aplicações dentro da construção civil, considerando as características do resíduo;
- Desenvolvimento de diferentes aplicações, incluindo seu processo de produção, com base em ciência dos materiais;

- Análise de desempenho frente às diferentes necessidades dos usuários para cada aplicação específica;
- Análise do risco ambiental do novo produto, incluindo contaminação do lençol freático, do ar interno e dos trabalhadores;
- Análise do impacto ambiental do novo produto que necessariamente deve envolver avaliação de riscos à saúde dos trabalhadores e dos usuários;
- Análise da viabilidade econômica;
- Transferência da tecnologia;

Esta série de características constitui um marco de referência para o estudo de resíduos de construção e demolição.

## **2.2 COMPOSIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS RCD**

Determinar a composição do resíduo de construção e demolição é uma etapa muito importante na sua caracterização física uma vez que os diferentes materiais que o constituem podem influir no comportamento de propriedades como a resistência mecânica, absorção de água e massa específica. É necessário conhecer a natureza dos componentes do resíduo para compreender melhor o comportamento do agregado reciclado, além de conhecer as diferentes classes de resíduos existentes dentro de uma obra, uma vez que nem todos eles são apropriados para reciclagem. A seguir se apresentam os materiais que podem constituir os RCD e a classificação deles segundo a legislação brasileira.

### **2.2.1 Composição do RCD**

Na França são utilizados diferentes tipos de resíduos para uso específico em construção de estradas. Entre outros materiais podem-se citar: concreto recuperado, material fresado, lamas, cinzas de carvão, resíduos de mineração, escórias de alto forno, escórias de aciaria, resíduos sólidos urbanos, fosfogesso, areias de fundição, xisto, carvão e pneus usados (François & Jullien, 2009).

Segundo Carneiro *et al.* (2001) os resíduos provenientes das atividades de construção e demolição, usualmente chamados de entulho, são geralmente considerados como material inerte. O entulho é um resíduo heterogêneo, basicamente composto por: concretos, argamassas e rochas que apresentam bom potencial para reciclagem; blocos, tijolos e cerâmicas, com alto potencial de reutilização; solos, areia e argila, que podem ser facilmente separados dos outros materiais por peneiramento; fresado de revestimento asfáltico, material

que pode ser reciclado e usado novamente em obras viárias; metais ferrosos, recicláveis pelo setor de metalurgia; madeiras, e outros materiais como plástico, borracha, papel e papelão podem ser reciclados, mas em muitos casos não se possuem as tecnologias adequadas para esses fins.

Conforme a EPA (2003), os RCD são gerados quando estruturas novas são construídas ou quando estruturas existentes são reformadas ou demolidas. Dentro das estruturas se incluem todos os prédios residenciais e não residenciais, tanto os projetos de obras públicas quanto estradas, rodovias, pontes, píeres e barragens. Os diferentes materiais que constituem o RCD variam de estado a estado e as componentes mais comuns encontradas nesses resíduos são apresentadas na Tabela 2–2.

**Tabela 2–2.** Materiais típicos que compõem os RCD nos Estados Unidos (Modificado de EPA, 2003)

<b>Materiais constituintes</b>	<b>Exemplo da composição</b>
Madeira	Formas de madeira, tocos de madeira/árvores.
Drywall	Lajes de gesso acartonado.
Metais	Tubos, barras e cabos de aço.
Plásticos	Revestimentos de vinil, portas, janelas, pisos, tubos e embalagens.
Cobertura	Madeira, telhas de ardósia e azulejos, mantas asfálticas.
Alvenaria	Blocos de concreto, tijolos, alvenaria de cimento.
Vidro	Janelas, espelhos, luzes.
Diversos	Carpetes, luminárias, isolamento, telhas cerâmicas.
Papelão	Geralmente usado para proteção de itens a serem instalados.
Concreto	Fundações, estacionamentos, calçadas de pedestres, pisos, superfícies de pavimento rígido.
Fresado de revestimento asfáltico	Calçadas para pedestres e estruturas de pavimento feitas com Concreto Asfáltico de Petróleo (CAP).

Kartam *et al.* (2004) dizem que os materiais que compõem os resíduos de construção e demolição são diversos, dependem do tipo de construção, do local de construção entre outras coisas e podem-se separar nos grupos seguintes:

- Materiais de escavação que podem ou não ter contaminantes;
- Resíduo gerado pela construção de rodovias ou estradas;
- Resíduo gerado durante a remodelação ou demolição de prédios ou estruturas materiais como concreto, madeira, plástico, papel, papelão e metal são comuns;
- Resíduo gerado durante a construção de estruturas tais como concreto, aço, vidro (janelas) e madeira (portas).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT-NBR/2004), o resíduo de construção pode ser dividido em resíduos de construção civil e agregados reciclados. A definição e composição deles são apresentadas a seguir:

- Resíduo de construção civil: se incluem neste grupo resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil como: tijolos, blocos, argamassa, gesso, telhas, cerâmicos e concreto. Os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais solos e rochas. Material resultante da reparação de rodovias como o pavimento asfáltico. Também encontram-se nesse grupo metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, vidros, plásticos tubulações e fiação elétrica. Todos esses materiais uma vez descartados são comumente chamados de entulhos de obras, calça ou metralha (NBR 15113, 2004).
- Agregado reciclado: material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis, que apresenta características técnicas para a aplicação em obras de edificação e infraestrutura (NBR 15116, 2004).

### **2.2.2 Classificação dos RCD**

A classificação dos resíduos de construção civil no Brasil, incluídos na norma NBR 15116/2004, obedece aos critérios definidos na Resolução CONAMA nº 307/2002. Nessa resolução são definidas as seguintes classes:

Classe A: Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados empregados na fabricação de concreto, reformas e reparos de pavimentação, demolição e obras de infraestrutura como solos provenientes de terraplenagem. Incluem-se também os resíduos gerados por reformas e reparos de edificações como componentes cerâmicos, tijolos blocos telhas, placas de revestimento, argamassa e concreto. Abrangem o grupo os resíduos obtidos pelo processo de fabricação ou demolição de peças pré-moldadas.

Classe B: Resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros e madeiras.

Classe C: Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem e recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso.

Classe D: Resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes e óleos, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas e instalações industriais.

## 2.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DE RCD

O resíduo de construção e demolição, após passar por um processo de reciclagem, pode ser empregado novamente em diferentes obras civis, mas sendo um material de composição heterogênea tem sofrido preconceitos vinculados a sua qualidade como material de construção. É por isso que ao se considerar o uso desses materiais, devem-se abordar as principais vantagens e desvantagens que o RCD pode apresentar.

### 2.3.1 Vantagens

A incorporação de resíduos na produção de materiais pode reduzir o consumo de energia e as distâncias de transporte de matérias primas. Além disso, a incorporação de resíduos permite muitas vezes a produção de materiais com melhores características técnicas, como é o caso da adição de microssílica, que viabiliza concretos de alta resistência mecânica, e da escória de alto forno, que melhora o desempenho do concreto frente à corrosão por cloretos (John, 2001).

As vantagens econômicas da reciclagem em substituição às deposições irregulares de RCD se apresentam de forma clara nos custos de limpeza urbana para as administrações municipais uma vez que os custos do descarte irregular, correção da deposição com aterramento e controle de doenças giram em torno de US\$ 10/m<sup>3</sup> de RCD para as prefeituras e o custo da reciclagem corresponde a 25% desse valor (Carneiro *et al.*, 2001).

Além da vantagem que representa a diminuição de materiais de construção e demolição dentro dos aterros sanitários pode-se contar com as seguintes vantagens que os RCD proporcionam em usos para pavimentação (Leite *et al.*, 2007; Carneiro *et al.*, 2001):

- Diminuição dos custos de pavimentação, sempre que estes materiais tenham um custo menor que os materiais convencionais levando em conta o fator transporte;
- Expansão pequena ou nula, ou seja, com entrada de água ou saturação não se apresentaram mudanças de volume nas camadas compactadas;
- Ganho de resistência devido à autocimentação, em função da eventual presença de atividade pozolânica;
- Melhoria nas condições de saneamento dos municípios e economia com a limpeza urbana, colaborando com programas municipais de gerenciamento de resíduos sólidos;
- Poupança de recursos minerais naturais, devido à menor velocidade de exploração das jazidas, com conseqüente diminuição de agressão ao meio ambiente;

- Diminuição dos custos de operação de aterros, devido à menor quantidade de resíduo envolvido;
- Necessidade de áreas menores para manutenção de aterros e bota-foras, em função do prolongamento da vida útil dos existentes;
- Redução do consumo de energia e geração de CO<sub>2</sub> na produção e transporte de materiais.

### **2.3.2 Desvantagens**

De uma forma geral, os agregados obtidos na reciclagem do entulho são mais porosos que os naturais, o que implica uma absorção de água mais elevada (Carneiro *et al.*, 2001).

Tam *et al.* (2008) afirmam que uma desvantagem dos resíduos de demolição de concreto é sua densidade baixa como resultado da alta porosidade. Portanto, é necessário mais água para assegurar a saturação completa da mistura de concreto com agregado reciclado e também é possível que a energia de compactação requerida seja maior.

Outros pesquisadores acham que a baixa densidade não é uma desvantagem e sim uma vantagem já que a baixa densidade desses materiais poderiam resolver os problemas de materiais de aterro sobre solos moles. E consideram desvantagem a heterogeneidade na sua composição já que esta pode gerar variabilidade na resposta mecânica do material.

Esses tipos de problemas fazem que os RCD sejam atualmente empregados apenas em obras com baixas especificações, como concreto não estrutural ou estradas com baixo nível de tráfego. Pesquisas efetuadas com esse tipo de resíduos têm demonstrado que determinadas porcentagens dos materiais naturais conservam suas propriedades físicas e mecânicas, mediante processos de reciclagem controlados, a fim de produzir materiais que possam ser usados em estruturas com especificações técnicas mais rigorosas.

## **2.4 NORMATIVAS**

A maioria dos países tem sua própria regulamentação referente ao uso de resíduos na construção de pavimentos. Na Holanda, por exemplo, os requisitos para que agregados reciclados sejam usados em sub-base de pavimentos foram publicados desde 1995, na *Standard Road Specifications* (RAW). A Itália segue a UNI *Standard* 10006, e no Reino Unido as especificações dos materiais estão no documento *Specification for Highway Works*. Na Austrália, a qualidade dos resíduos reciclados é regulada por *Guidelines for Recycled Buildings Materials* (Hendriks & Janssen, 2001; Poon, 1997).

No Brasil, no ano de 2004 a ABNT publicou a norma para aplicação de agregados reciclados em pavimentação, a NBR 15115. Segundo esta norma, os agregados reciclados aplicáveis à pavimentação, são aqueles materiais granulares, obtidos mediante britagem ou beneficiamento mecânico, de resíduos de construção civil, pertencentes à Classe A como definido anteriormente.

Em 2003, a Prefeitura do Município de São Paulo publicou a especificação de serviço PMSP/SP ETS – 001/2003. Nessa especificação se definem os materiais e os requisitos necessários para uso de RCD em camadas de reforço de subleito, sub-base, e base mista de pavimento. Esses requisitos são listados a seguir:

- a. Os agregados utilizados, obtidos a partir da britagem e classificação de resíduos sólidos de construção civil deverão ser constituídos por fragmentos duros, limpos e duráveis, livres de excesso de partículas lamelares ou alongadas, macias ou de fácil desintegração, e de outras substâncias ou contaminações prejudiciais;
- b. O agregado reciclado deverá apresentar curva granulométrica contínua e bem graduada, com coeficiente de curvatura compreendido entre 1 e 3 e coeficiente de uniformidade  $C_u \geq 10$ ;
- c. A porcentagem que passa na peneira 0.42mm (Nº 40) deverá ficar entre 10 e 30%;
- d. Os agregados reciclados serão classificados quanto ao tipo de emprego possível na execução de camadas de pavimentos, segundo parâmetros de Índice de Suporte Califórnia (CBR), obtidos por meio do ensaio PMSP/SP ME-09/92, conforme abaixo discriminado:
  - material para execução de reforço de subleito:  $CBR \geq 12\%$ , Expansão  $\leq 1,0\%$  (energia de compactação normal);
  - material para execução de sub-base:  $CBR \geq 20\%$ , Expansão  $\leq 1,0\%$  (energia de compactação intermediária);
  - material para execução de base mista de pavimento:  $CBR \geq 60\%$ , Expansão  $\leq 0,5\%$  (energia de compactação intermediária); será permitido o uso como material de base mista somente para vias de tráfego com  $N \leq 10^5$  repetições do eixo padrão de 80 kN no período de projeto.
- e. No caso de materiais que não atendam às exigências do item anterior, estes poderão ser estabilizados granulométrica ou quimicamente. No caso de adição de cimento e/ou cal hidratada, o material deverá ser submetido ao ensaio de resistência à compressão simples, após sete dias de cura e apresentar resistência de no mínimo 2.1 MPa, em corpos de prova moldados na energia de compactação especificada;

f. Para o agregado graúdo, fração retida na peneira 4.8mm (Nº4), a porcentagem de grãos de forma lamelar, obtida nas amostras de ensaios não poderá ser superior a 30% e a determinação da forma lamelar dos grãos estará dada pela seguinte equação:

$$\lambda^* + 1.25g \geq 6e \quad (2.1)$$

onde:

$\lambda^*$  – maior dimensão do grão entre dois planos paralelos;  
e – afastamento mínimo entre dois planos paralelos, entre os quais pode ficar contido o grão;  
g – a média das aberturas de duas peneiras de malhas quadradas, entre as quais fica retido o grão;

g. Diâmetro máximo dos grãos: 50 mm;

h. Materiais indesejáveis de características distintas: máximo de 3% em massa;

i. Materiais indesejáveis de mesma característica: máximo de 2% em massa;

j. Não serão permitidos materiais indesejáveis nocivos ao meio ambiente ou à saúde do trabalhador.

De acordo com François & Jullien (2009) as camadas de materiais alternativos dependem da sua posição dentro da estrutura e das propriedades como permeabilidade e porosidade que por sua vez estão sujeitas à infiltração de água ou aumento das águas subterrâneas, outro efeito a considerar é a difusão de ar ou carbonatação. Como resultados dos fenômenos anteriores, as diferentes camadas da estrutura de pavimento, podem interagir através da migração de produtos químicos transportados por lixiviados.

Um ponto a considerar dentro das propriedades dos materiais alternativos é a capacidade de transportar contaminantes. Segundo diferentes autores, os RCD podem ser classificados como materiais inertes, mas é necessário garantir essa condição para utilizá-lo em qualquer estrutura. Na análise desse tipo de problema, a ABNT possui normas que classificam os resíduos sólidos e avaliam os riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que esses resíduos possam ter manuseio e destinação adequados (NBR 10004, 1987). O procedimento para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados como classe I – perigosos - e classe II – não perigosos encontram-se na norma NBR 10005 (2004). Na norma NBR 10006 (2004) se fixam os requisitos exigidos para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados como classe II A - não inertes – e classe II B – inertes, e

não considera resíduos em estado líquido. Finalmente a norma NBR 10007 (2004) determina a forma como devem ser obtidas as amostras de resíduos a serem avaliados.

## **2.5 USO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RCD**

Alguns usos potenciais para os RCD são: agregado para concreto de baixa resistência, pavimentação de rodovias, material para drenos ou para recheio de estruturas de contenção, produção de blocos de cimento, fabricação de blocos pré-moldados para pavimentação, construção de calçadas. A eficiência da reciclagem dos RCD pode ser melhorada, caso exista um conjunto de instruções acompanhadas de avanços tecnológicos e de procedimentos cientificamente testados (Kartam *et al.*, 2004).

Vários autores têm definido os usos possíveis para os agregados reciclados na engenharia. Brito Filho (1999) lista o uso como camadas drenantes em ausência de finos, lastro para assentamento de tubos ou de guias, e envelopamento de galerias de estabilização de solos expansíveis ou com baixa capacidade de suporte. Segundo Lima (1999), os agregados reciclados podem ser empregados na produção de concreto e argamassa para diferentes fins como contra pisos e componentes de alvenaria. Em países como a Austrália, é comum se misturar agregados reciclados de concreto com quantidades limitadas de tijolos britados e solo para a obtenção de um produto reciclado considerado adequado para uso em pavimentação (Bakoos & Sri Ravindraiah, 1999).

Os agregados reciclados também podem ser empregados em regularização e cascalhamento de ruas de terra, sendo vantajosos tecnicamente neste tipo de situação em relação às britas corridas comuns em virtude de sua coesão proveniente de reações pozolânicas que o tornam menos erodíveis (Brito Filho, 1999).

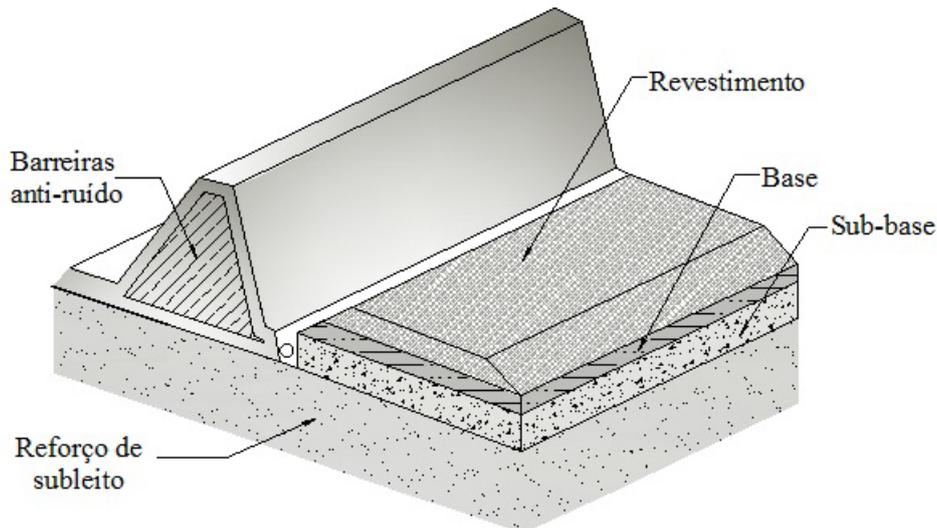
Na Suécia agregados reciclados de concreto têm sido usados para as diferentes camadas da estrutura de pavimentos, obtendo-se incremento no módulo de resiliência segundo os diferentes períodos de cura, e aumentando a sua resistência ao longo do tempo (Arm, 2001).

Segundo François & Jullien (2009), o uso dos RCD em pavimentação dependerá das características da sua composição e das condições locais que incluem: intensidade das cargas mecânicas induzidas pelo tráfego rodoviário, temperatura ambiente, umidade, reação a vários produtos que podem ser derramados sobre o curso de superfície e penetrar na estrutura. Por outro lado, a localização do material alternativo e o custo de transportá-lo são fundamentais para viabilizar seu uso em pavimentação.

A partir da publicação da resolução CONAMA N°307 (2002), várias pesquisas têm sido desenvolvidas no Brasil na área de pavimentação, caracterizando resíduos de construção física, química e mecanicamente. Cidades como Belo Horizonte, Rio de Janeiro, São Paulo, Goiânia, Uberlândia, Salvador, João Pessoa, Brasília entre outras, já tiveram experiências em pavimentação com esses tipos de materiais alternativos chegando à conclusão que os RCD, apresentam boas condições de utilização, desde que sejam convenientemente reciclados (Motta & Fernandes, 2003; Balzan *et al.*, 2003; Dias *et al.*, 2006; Góngora, 2011).

Fernandes (2004) afirma que um aspecto que dificulta a utilização de agregados reciclados é a sua aparente heterogeneidade. No Brasil, o controle tecnológico necessário para o emprego efetivo desses materiais depende de estudos que forneçam parâmetros para a sua avaliação, visto ser este controle essencial ao emprego do agregado reciclado em pavimentação. Os estudos nesse sentido estão em fase inicial.

Para Petkovic *et al.* (2004) todas as estruturas envolvidas em uma obra rodoviária podem ser construídas com materiais recicláveis, incluindo-se: o revestimento, a base, a sub-base, o reforço de subleito, as drenagens sub-superficiais para controle do nível freático e também as barreiras anti-ruído. A Figura 2-1 ilustra cada uma das estruturas mencionadas.



**Figura 2-1.** Diferentes usos de materiais reciclados em pavimentação (Petkovic, 2004).

Motta (2005) analisou em laboratório aspectos físicos e mecânicos de um agregado, reciclado da cidade de São Paulo, utilizado para confecção de camadas de base e sub-base. Com o intuito de avaliar o desempenho do material a autora executou ensaios de: compactação, CBR, resistência à tração por compressão diametral, resistência à compressão simples e módulo de resiliência. A pesquisa chegou à conclusão de que o agregado reciclado

de resíduo sólido da construção civil tem uma perspectiva promissora como insumo para a construção de camadas de bases e sub-bases em vias de baixo volume de tráfego, e podem ser usados em substituição aos materiais convencionais para as condições referidas.

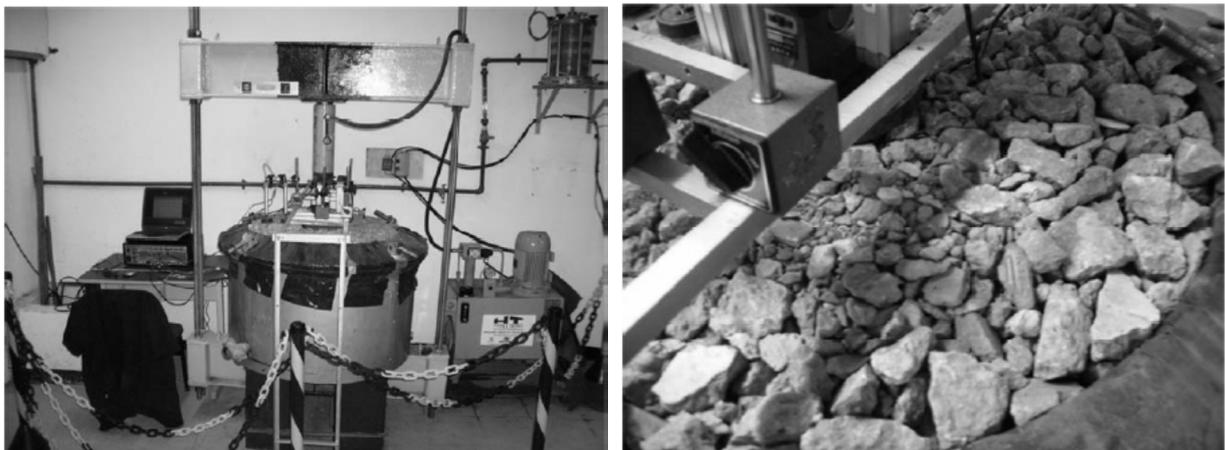
Oliveira (2007) fez análises laboratoriais sobre três frações de agregados reciclados de concreto, denominadas de ARC 19.1 (fração grossa), ARC 9.5 (fração média) e ARC 4.8 (fração fina) e três frações de agregados reciclados mistos, denominadas de ARM 19.1 (fração grossa); ARM 9.5 (fração média) e ARM 4.8 (fração fina). Esses resíduos foram misturados com diferentes dosagens, com dois tipos de solo argiloso da cidade de Goiânia e foram usados em pistas experimentais (CEASA e Recanto do Bosque). Ensaio como pH, CBR, e módulo de resiliência permitiram obter informação sobre o ganho de resistência mecânica das misturas ao longo do tempo. Os resultados desses ensaios mostraram bons indicadores de desempenho, apresentando uma faixa de valores adequada para o emprego dos agregados reciclados em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis. Os valores indicaram, apesar da necessidade de estudos complementares, a possibilidade de emprego dos RCD em pavimentos de tráfego médio e pesado embora isso não seja recomendado pela ABNT.

Combinações de RCD com materiais sintéticos alternativos também têm sido estudadas, tais como tiras ou grãos de borracha de pneus usados e garrafas PET prensadas. Esses materiais podem ser utilizados em substituição a materiais granulares naturais em sistemas drenantes. A presença de um geotêxtil envolvendo material drenante alternativo pode servir como um elemento de filtro para o sistema. A utilização desses materiais alternativos, além de dar uma destinação ambientalmente amigável para tais resíduos, pode representar economias substanciais em regiões onde materiais drenantes convencionais sejam escassos ou caros (Palmeira, 2010).

Góngora (2011) analisou o comportamento de brita e RCD como materiais de aterro de estradas não pavimentadas mediante ensaios de carregamento cíclico. A estrutura de pavimento era composta por um subleito de solo mole de 30 cm de altura e um aterro em brita ou RCD atuando como material de base de 23 cm, confinada em uma estrutura circular de 75 cm de diâmetro (ver Figura 2-2). A ideia era simular a carga produzida por um semi-eixo padrão. A carga de 18 kN foi aplicada a uma frequência de 1Hz mediante uma placa circular de 20 cm de diâmetro, e quando a estrutura de pavimento atingia um deslocamento de 25 mm o ensaio era parado. O material de aterro que apresentou melhor comportamento em termos de resistência ao número de ciclos de carga foi de forma geral o feito com RCD, chegando a

1710 ciclos de carga, enquanto o construído com brita atingiu os 25 mm de deslocamento com 1630 ciclos.

Santos (2011) investigou o potencial de uso de materiais alternativos em estruturas de solo reforçado (ESR) por meio da construção, instrumentação e monitoramento de 3 muros experimentais executados em escala real. Foram empregados dois tipos de material de aterro, sendo os muros 1 e 2 construídos com RCD como apresentado na Figura 2-3 e o muro 3 com um solo siltoarenoso. A caracterização do RCD foi realizada buscando apontar eventuais propriedades/características que pudessem comprometer ou inviabilizar o uso desses materiais em ESR. Os resultados obtidos da instrumentação dos muros permitiram concluir que o melhor comportamento geotécnico deles foi apresentado nos muros 1 e 2 cujo material de aterro foi o RCD.



**Figura 2-2.** Montagem geral do ensaio e detalhe do aterro com RCD (Góngora, 2011).



**Figura 2-3.** Muros 1 e 2 construídos com RCD como material de aterro (Santos, 2011)

## 2.6 AVALIAÇÃO DA QUEBRA DOS GRÃOS E DAS PROPRIEDADES CIMENTANTES DOS RCD

Dois problemas básicos são de grande interesse no desenvolvimento da pesquisa. Um deles tem a ver com a quebra dos grãos durante a compactação e o outro, a cimentação e o ganho de resistência do resíduo devido ao tempo de cura.

### 2.6.1 Quebra dos Grãos

Algumas das propriedades mais importantes dos solos granulares empregados nas obras de engenharia tais como: forma da curva tensão-deformação; resistência à compressão; mudanças de volume; dissipação de poro pressão e a permeabilidade dependem da integridade das partículas e da quebra que se produz devido a mudanças nas tensões. Por isso é importante quantificar e identificar os efeitos que a quebra de grãos produz nessas propriedades (Lade et al., 1996).

Grandes barragens, por exemplo, aplicam aos materiais subjacentes altas tensões que geram mudanças significativas no tamanho e distribuição granulométrica dos materiais granulares originais. Essa mudança é o resultado da quebra de partículas e afeta principalmente a permeabilidade do material da barragem (Lade *et al.*, 1996).

Pesquisas anteriores têm demonstrado que a quebra dos grãos ocorre durante a compactação, apesar da boa qualidade dos agregados empregados. Ensaio de laboratório indicam que essa quebra pode reduzir o módulo de resiliência dos agregados à metade e incrementa a deformação permanente de uma a três vezes, dependendo do estado de densidade e de tensão considerados (Zeghal, 2009).

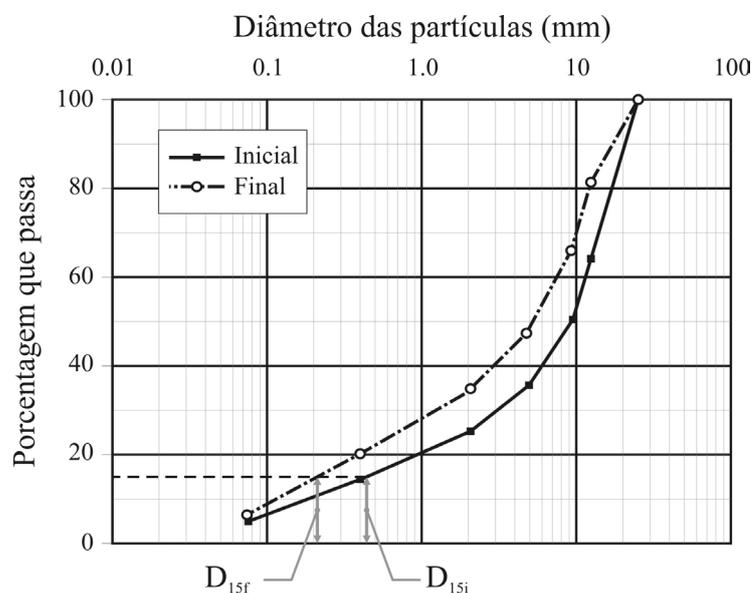
Diferentes ensaios têm mostrado que quando usados métodos de compactação por impacto; a quebra dos grãos em agregados reciclados de concreto (RCA por suas siglas em inglês) se apresenta de forma angulosa, gerando uma textura superficial rugosa. Isso faz aparecer partículas menores que incrementam a coesão (Park, 2003).

Embora o fenômeno de quebra de grãos fosse reconhecido na década de 1920, só foi considerado como um problema na engenharia ao final de 1950 quando o pessoal da Divisão de Engenheiros do Exército Norte-americano (*US Army Engineers Corps*) observou a degradação durante a utilização do agregado graúdo como base (Aughenbaugh *et al.*, 1966).

A quebra das partículas pode ocorrer também sob a ação de baixas tensões, dependendo das características individuais dos grãos de material. Vários fatores ou índices de

quebra têm sido propostos para quantificar esse fenômeno, mas todos eles são de natureza empírica e são baseados nas variações dos tamanhos das partículas ou nas mudanças das agregações entre elas. Alguns desses índices são apresentados a seguir.

Lee & Farhoodmand (1967) desenvolveram uma medida para quebra de partículas quando pesquisavam o comportamento de materiais granulares empregados como filtro para barragens. Ensaio em condições isotrópicas foram aplicados em areias. A mudança no tamanho das partículas foi medida a partir de um diâmetro único ( $D_{15}$ ) que corresponde a 15% dos finos da curva granulométrica antes (inicial) e depois (final) dos ensaios como se pode observar na Figura 2-4.



**Figura 2-4.** Avaliação da quebra dos grãos (Lee & Farhoodmand, 1967)

A medida da quebra dos grãos é a relação entre os diâmetros correspondentes a 15% dos finos antes e depois do ensaio como apresentado a seguir:

$$B = \frac{D_{15 \text{ inicial}}}{D_{15 \text{ final}}} \quad (2.2)$$

Marsal (1975) desenvolveu o índice  $B_g$  para quantificar a quebra das partículas. Seu método consistiu em medir as mudanças individuais entre as partículas, levando em conta a distribuição granulométrica de materiais empregados na construção de barragens de terra e enrocamentos, antes e após ensaios de compressão triaxial de grande escala. Os corpos de prova usados eram cilíndricos com 1.13 m de diâmetro e 2.5 m de altura. Para o cálculo de  $B_g$ , é necessário conhecer as curvas granulométricas do material antes e após o ensaio a fim de achar as diferenças entre os pesos retidos iniciais e finais ( $\Delta W_k = \Delta W_{ki} - \Delta W_{kf}$ ) correspondentes às frações  $k$  de diâmetro  $d_{nk}$  como apresentado na Figura 2-5.

O cálculo do parâmetro  $B_g$  é dado por:

$$B_g = \sum_{k=1}^n \langle \Delta W_k \rangle \quad (2.3)$$

Onde  $\langle \quad \rangle$  é o colchete de Mc Cauley e  $\langle \Delta W_k \rangle = \Delta W_k$  se  $\Delta W_k \geq 0$  e  $\langle \Delta W_k \rangle = 0$  se  $\Delta W_k < 0$

A soma de todos os valores  $\Delta W_k$  deve ser igual a zero (Figura 2-6). O fator de quebra de Marsal ( $B_g$ ) é a soma dos valores positivos  $\Delta W_k$ , que representa a porcentagem em peso dos grãos que sofreram fragmentação. Os limites do fator quebra definido estão entre zero (0%), a menor porcentagem de quebra, e cem (100%) a máxima que o material possa sofrer.

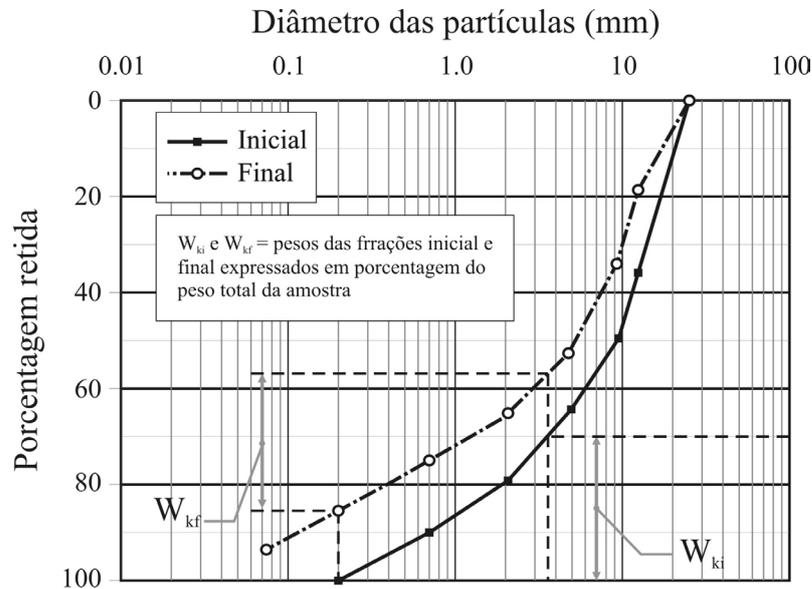


Figura 2-5. Mudança na distribuição granulométrica produzida pela rotura dos grãos (Marsal, 1975)

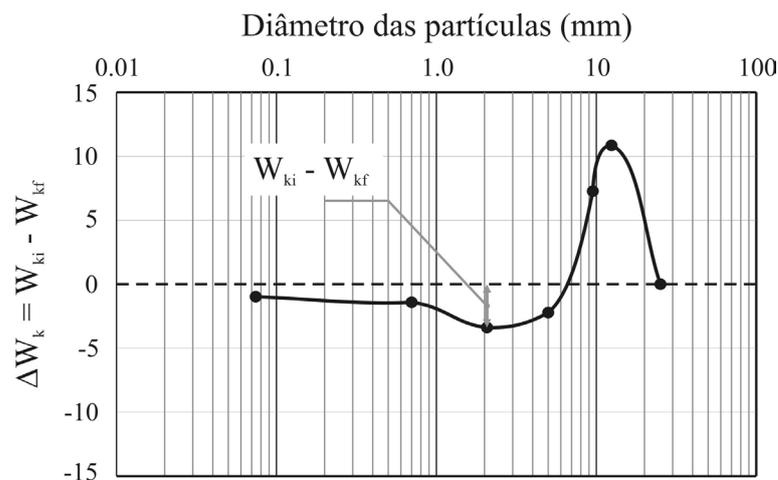
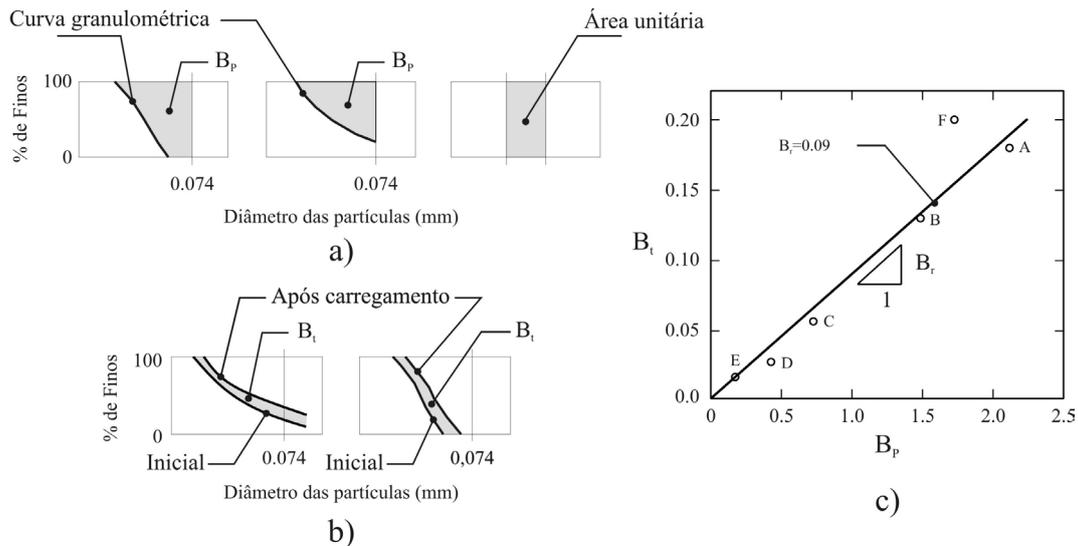


Figura 2-6. Representação gráfica da variação dos pesos inicial e final pelo método de Marsal, (1975)

Hardin (1985) baseou o seu método para medir a quebra dos grãos na mudança de toda a curva granulométrica, definindo duas variáveis diferentes: (1) à quebra potencial  $B_p$ ,

definida como a área abaixo de curva granulométrica original do material granular e a peneira N° 200; (2) a quebra total  $B_t$ , definida como a área entre a curva granulométrica original e a curva granulométrica final do material após aplicação do ensaio. Hardin definiu a quebra relativa,  $B_r$ , apresentada na (2.4), como a relação existente entre a quebra total e a quebra potencial, sendo o limite inferior o zero e como limite superior teórico a unidade. A (Figura 2-7) apresenta os diferentes parâmetros pelo referenciado autor.

$$B_r = B_t/B_p \quad (2.4)$$



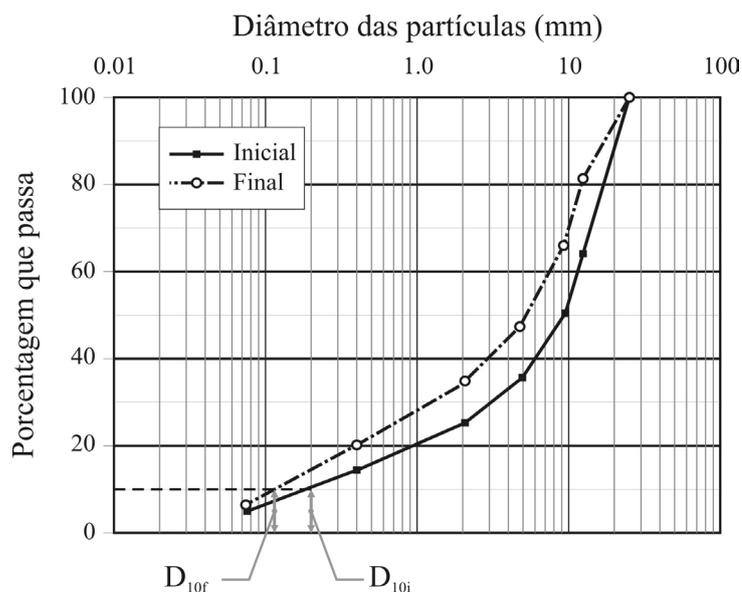
**Figura 2-7.** Mudança na distribuição granulométrica produzida pela quebra dos grãos: a) definição de quebra potencial; b) definição de quebra total; c) relação entre quebra total e quebra potencial (Hardin, 1985)

Lade *et al.* (1996) propuseram um método baseado nas curvas granulométricas do material antes e após de ser submetido a ensaios, levando em conta o diâmetro efetivo, equivalente a 10% dos finos ( $D_{10}$ ), como se apresenta na Figura 2-8.

O índice de quebra chamado  $B_{10}$ , se calcula como uma unidade menos a relação entre o diâmetro efetivo equivalente ao final do ensaio e o diâmetro efetivo equivalente antes do ensaio.

$$B_{10} = 1 - (D_{10f}/D_{10i}) \quad (2.5)$$

O limite inferior do índice de quebra  $B_{10}$  é zero se não há quebra de partículas e o superior é a unidade quando a quebra das partículas é infinita.



**Figura 2-8.** Mudança na distribuição granulométrica produzida pela rotura dos grãos (Lade *et al.*, 1996)

No Brasil, a degradação ou quebra dos grãos provocada pela compactação Proctor pode ser quantificada mediante o procedimento descrito na norma DNER-ME 398/99. O método foi desenvolvido para uma curva granulométrica padrão e leva em conta as porcentagens de material que passa em seis peneiras antes e após compactação, fazendo a subtração entre as porcentagens inicial e final ( $D$ ).

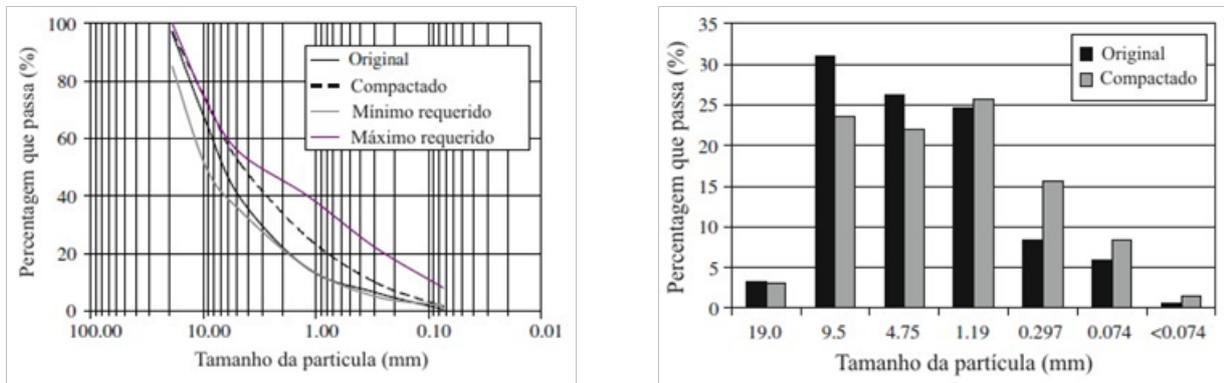
$$ID_p = \sum D/6 \quad (2.6)$$

O índice de degradação  $ID_p$  corresponde à soma das diferenças dos materiais que passam por cada peneira, dividido pelo número 6 que corresponde à quantidade de peneiras usadas, durante a pesquisa as peneiras usadas para o cálculo do  $ID_p$  foram: 25.4 mm (1"), 12.5 mm (1/2"), 9.5 mm (3/8"), 4.75 mm (N°4), 2.0 mm (N°10), 0.425 mm (N°40) e 0.075 mm (N°200).

A análise da quebra dos grãos induzida pelo processo de compactação em materiais granulares tem sido objeto de estudo de diferentes autores através da mudança de tamanho e distribuição das partículas. Zeghal (2009), trabalhando com corpos de prova compactados no laboratório com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura em 8 camadas de 37.5 mm mostrou que a distribuição e tamanho dos grãos são alterados com o processo de compactação (Figura 2-9).

Na década de 1960, foram desenvolvidas diferentes pesquisas sobre a quebra dos grãos durante diversos ensaios de laboratório e campo; chegando à conclusão que o índice de quebra aumenta com o aumento de tamanho dos materiais granulares e com a sua

angularidade. Também depende da tensão de confinamento aplicada e da tensão cisalhante obtida para uma dada tensão de confinamento (Vesic & Barksdale, 1963; Aughenbaugh *et al.*, 1966).



**Figura 2-9.** Mudança na graduação com o processo de compactação (Zeghal, 2009).

Entre 1970 e 1980, os pesquisadores se concentraram em achar o intervalo de tensões de confinamento onde começa a ruptura dos grãos e até onde chega. Essas tensões foram obtidas mediante aplicação de carregamentos estáticos e dinâmicos. A conclusão foi que essas tensões dependem: do tamanho de agregado avaliado, da umidade do material, da relação de vazios e do estado e dureza de cada partícula, obtendo-se resultados muito variáveis (Marsal, 1973; Lambe & Whitman, 2002; Holts & Kovacs, 1981; Forssblad, 1981).

Nos anos 90, outras pesquisas confirmaram o que já tinha sido demonstrado no passado, isto é, os agregados empregados para os diferentes fins da engenharia civil são submetidos a carregamentos estáticos ou dinâmicos, e como consequência, algumas partículas sofrem abrasão e outras ruptura (Lade *et al.*, 1996; Coop, 1999; Raymond, 2000).

Na última década as pesquisas têm focado novamente na compactação e na distribuição das partículas, assim como o cisalhamento dos materiais granulares. As análises não têm sido apenas físicas, ferramentas numéricas também têm sido empregadas. Jensen *et al.* (2001) usaram um modelo numérico para estimar o dano das partículas, envolvendo elementos discretos. Zeghal & Edil (2002) estudaram uma areia de quartzo mediante o ensaio de cisalhamento direto modificado; a fim de analisar a possível relação existente entre a quebra dos grãos e os problemas de interação solo estrutura.

Devido à heterogeneidade na composição, pesquisas desenvolvidas no Brasil, têm estudado esse fenômeno mediante diferentes ensaios físicos. Fernandes (2004) avalia o comportamento do resíduo mediante o ensaio de abrasão “Los Angeles” chegando a um valor de 52%. Motta (2005) com base em trabalhos de laboratório determinou uma energia de

compactação para os corpos de prova menor à modificada para diminuir a quebra dos grãos do agregado reciclado, embora acredita que o uso de alta energia de compactação seja sempre recomendável. Oliveira (2007) ponderou a resistência dos grãos determinada pelos índices de abrasão Los Angeles e de degradação após a compactação Proctor –  $ID_p$ . Para as amostras analisadas, os valores obtidos se encontraram dentro dos valores aceitos pelas normas brasileiras.

## 2.6.2 Propriedades Cimentantes

A natureza heterogênea do RCD requer a avaliação da composição química e mineralógica do material a fim de determinar se os minerais presentes no resíduo podem reagir e gerar novas cadeias cimentantes que possibilitem o aumento da resistência do material ao longo do tempo.

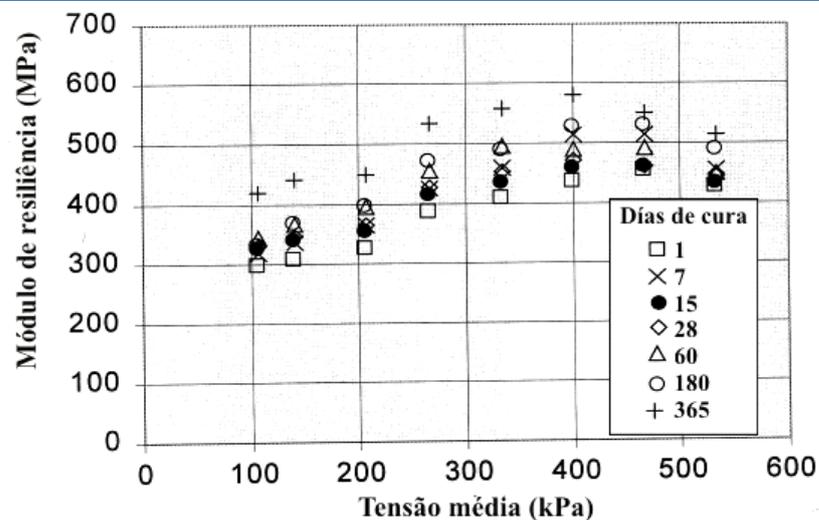
Segundo Pinto (1998), os resíduos de construção reciclados apresentam componentes com algumas propriedades relevantes para o desempenho de materiais de construção, destacando-se as partículas de cimento não inertizadas, que ainda irão reagir, partículas de cal, que estarão disponíveis para novas reações, partículas cristalizadas, que funcionarão como indicador da cristalização (acelerando a formação da nova rede cristalina), e partículas de material cerâmico, com significativo potencial pozolânico, que irão reagir com a cal hidratada.

Vázquez (2001) afirma que o incremento da resistência é mais significativo quando os agregados reciclados provêm do concreto, em menor quantidade quando os agregados são mistos e quase nenhum ganho quando são cerâmicos.

Considerando que os resíduos de construção civil e demolição são constituídos por materiais naturais, existe a possibilidade de que os minerais presentes possam reagir provocando algum ganho ou perda de resistência ao longo do tempo. Esse fenômeno foi estudado por Arm (2001), utilizando ensaios triaxiais cíclicos feitos em amostras de agregados reciclados de concreto com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, compactados simultaneamente por compressão e vibração até atingir um grau de compactação de 97%. Diferentes períodos de cura, entre 1 e 730 dias, corpos de prova foram testados chegando à conclusão que o módulo de resiliência apresenta um incremento após 90 dias e continua aumentando conforme aumenta o período de cura. Os resultados destes ensaios podem ser observados na Figura 2-10.

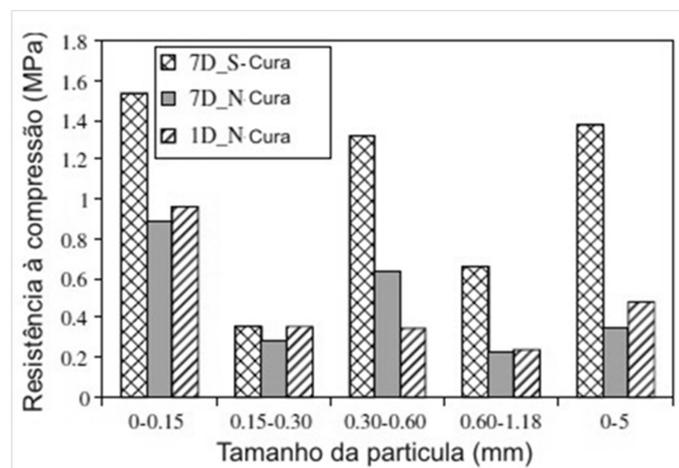
Motta (2005), por meio do ensaio Chapelle Modificado, encontrou valores de atividade pozolânica entre 130 e 134 mg de CaO/g de amostra para um agregado reciclado da

cidade de São Paulo. Apesar de os valores encontrados na pesquisa serem inferiores aos 330 mg especificados pelo ensaio, não se descarta a possibilidade de que o agregado reciclado possa influenciar positivamente na resistência mecânica do pavimento.



**Figura 2-10.** Aumento do módulo de resiliência segundo o tempo de cura (Arm, 2001)

Poon *et al.* (2006) avaliaram o comportamento de uma mistura de agregados finos e grossos reciclados de concreto, utilizados como materiais de sub-base, mediante ensaios de difração de raios X, pH, resistência à compressão e permeabilidade. Os ensaios de resistência à compressão foram feitos com corpos de prova de 40 mm de diâmetro e 80 mm de altura, para cinco frações de finos: <0.15, 0.15-0.30, 0.30-0.60, 0.60-1.18 e <5.0 mm. A resistência à compressão simples das frações mencionadas anteriormente submetidas a dois períodos de cura (1 dia e 7 dias) e a duas temperaturas diferentes (25 °C N-cura e 65 °C S-cura) são apresentados na Figura 2-11.



**Figura 2-11.** Resistência à compressão de amostras com diferentes frações de finos (Poon et al., 2006)

Nessa figura é possível observar que o regime de cura S-cura acelerou o desenvolvimento da resistência. Percebe-se que as frações <0.15 e 0.3-0.6 mm têm maior resistência à compressão em comparação com as outras frações. A resistência à compressão para essas duas frações foram de 1.54 e 1.32 MPa, respectivamente. Em contraste, os pontos com menor resistência corresponderam às frações de tamanho 0.15-0.30 e 0.60-1.18 mm. A elevada resistência à compressão para as frações mencionadas foi atribuída à presença de Belita (C<sub>2</sub>S) na fração <0.15 mm e a produtos amorfos de hidratação na fração correspondente a 0.30-0.60 mm.

Leite *et al.* (2006) fizeram uma análise comparativa entre os valores do ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR) obtidos para quatro amostras de RCD e uma amostra de brita graduada simples. Os RCD foram coletados no Município de Santo André e na usina recicladora de Itaquera em São Paulo. Dos resultados apresentados na Tabela 2–3, é possível observar que com o tempo de cura houve um aumento equivalente a 25% dos valores de CBR, indicando o ganho de resistência do material com o tempo. O aumento na resistência pode ser explicado em função do potencial pozolânico do agregado reciclado *in natura*; ativado possivelmente pela ação da compactação através do aumento significativo de finos que aliada à adição de água, provocou a reação pozolânica com o tempo.

**Tabela 2–3.** Valores de CBR reportados por Leite, (2006)

<b>Material</b>	<b>Energia de compactação</b>	<b>CBR (%)</b>		<b>CBR (%) após 28 dias</b>	
Amostra 1 – Agregado reciclado	Normal	45.5		-	
Amostra 2 – Agregado reciclado	Intermediária	96.0		-	
Amostra 3 – Agregado reciclado	Intermediária	76.0	74.0	-	
Amostra 4 – Agregado reciclado	Intermediária	-		87.0	101
Amostra 5 – Brita graduada simples	Intermediária	90.0			

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

A metodologia de análise do RCD como material para camadas de base de pavimentos, utilizada nesta pesquisa é baseada nos métodos tradicionais de caracterização física, química e mecânica de agregados naturais. Diversos pesquisadores avaliaram o comportamento de RCD e de agregados reciclados de concreto (ARC ou RCA recycled concrete aggregate, em inglês) em diferentes obras de engenharia, tratando o RCD empregado como agregado natural (Park, 2003; Bianchini *et al.* 2005; Motta, 2005; Oikonomou, 2005; Angulo, 2005; Tam *et al.* 2008; Santos, 2010) todas essas pesquisas fazem referência a ensaios normalmente usados para a caracterização dos agregados. O fato de testar o material alternativo como um agregado natural, permite fazer uma comparação entre a qualidade oferecida pelo RCD e pelos materiais tradicionais, usados em diferentes obras de infraestrutura. Neste capítulo são apresentados todos os ensaios de caracterização feitos sobre uma amostra de RCD de Brasília resultante da demolição do estádio Mané Garrincha.

#### **3.1 SELEÇÃO E COLETA DE MATERIAL**

O resíduo de construção e demolição sobre o qual se fazem todas as caracterizações físicas, químicas e mecânicas desta pesquisa, foi fornecido por Areia Bela Vista, empresa dedicada à exploração e produção de areia natural para fabricação de concreto e argamassa e à reciclagem de RCD para a produção de areia utilizada em concreto asfáltico. O material selecionado faz parte do entulho gerado durante a demolição do estádio Mané Garrincha da cidade de Brasília. Esses resíduos foram levados e estocados em Sobradinho II onde a empresa Areia Bela Vista tem suas instalações, a fim de serem submetidos ao processo de reciclagem.

Dentro do reconhecimento preliminar de campo, foi possível observar que o entulho era composto em maior parte por pedaços de concreto, argamassa, tijolos, telhas, contra pisos e azulejos. Materiais contaminantes como: barras de aço, tubos de ferro, tubos de PVC e pedaços de madeira com tamanhos superiores a 50 cm também estavam presentes no local. Materiais incluídos na classe C da resolução CONAMA N° 307/2002 tais como o gesso, não foram encontrados; uma vez que essa empresa não aceita esse resíduo para o seu processo de reciclagem. A Figura 3-1 dá uma ideia dos diferentes materiais e as frações que compõem o entulho proveniente da demolição do estádio, assim como a forma de armazenagem dentro da recicladora.



**Figura 3-1.** Entulho gerado pela demolição do Estádio Mané Garrincha. Pátio de armazenamento empresa Areia Bela Vista.

### **3.1.1 Triagem e Britagem Primária**

Uma vez feito o reconhecimento preliminar do material, começou-se o processo de triagem para a separação do material contaminante de tamanho maior e se iniciou a britagem. Durante este processo pequenos fragmentos metálicos foram retirados com ajuda de uma banda magnética instalada no britador. A Figura 3-2, apresenta o britador de mandíbulas da empresa Areia Bela Vista utilizado para a trituração primária.



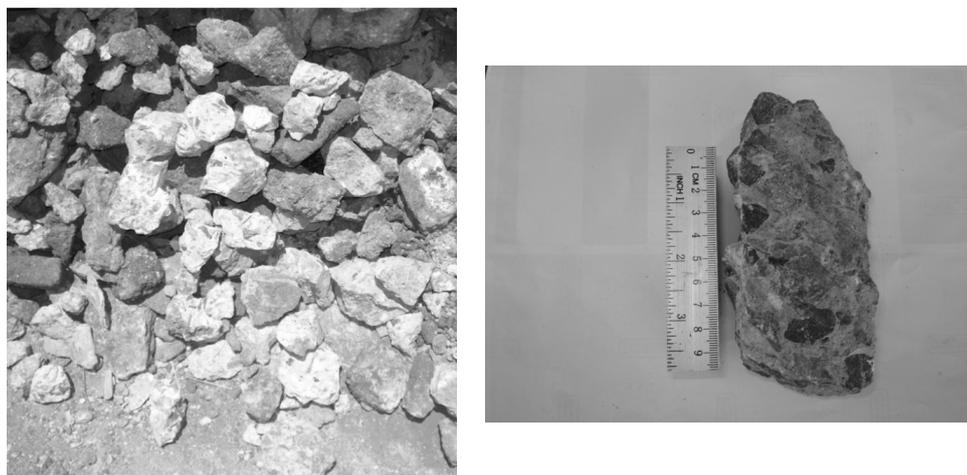
**Figura 3-2.** Britador de mandíbulas empresa Areia Bela Vista

O britador de mandíbulas utilizado é de marca Metso - Nordberg série C 80/50 e as especificações técnicas são apresentadas na Tabela 3-1.

**Tabela 3-1.** Especificações técnicas do Britador C 80/50

Parâmetro	Especificação
Tipo de Britador	C80
Largura da abertura de alimentação	800 mm
Profundidade da abertura de alimentação	510 mm
Tamanho do produto	0-120 mm
Produção	110-150 (t/h)
Potência	75 kW
Velocidade	350 rpm

O material foi reduzido a um tamanho médio entre 10 e 12 cm (Figura 3-3). Durante a britagem e como processo adicional, foi retirado o aço restante por meio de bandas magnéticas instaladas na esteira de saída do britador; uma quantidade aproximada de 12 toneladas de entulho foi transformada em RCD e transportada em caminhão para o Laboratório de Engenharia Rodoviária (LER) da Universidade de Brasília (UnB), sendo armazenado em um local protegido da chuva e posteriormente re-britado e caracterizado.



**Figura 3-3.** RCD após do primeiro processo de britagem

### 3.1.2 Triagem e Britagem Secundária

A segunda britagem foi feita em várias etapas uma vez que era necessário chegar a uma granulometria adequada que permitisse o uso do RCD como camada de base. Assim, duas amostras do material foram selecionadas e levadas para dois laboratórios da UnB (Geocronologia e Geociências). Ambos os laboratórios contam com britadores de mandíbula com diferentes tamanhos de abertura entre as mandíbulas, gerando um agregado mais ou menos fino dependendo do britador usado. A Tabela 3-2 apresenta as especificações técnicas dos britadores usados na pesquisa.

**Tabela 3–2.** Especificações técnicas do britador de mandíbulas do laboratório de Geocronologia

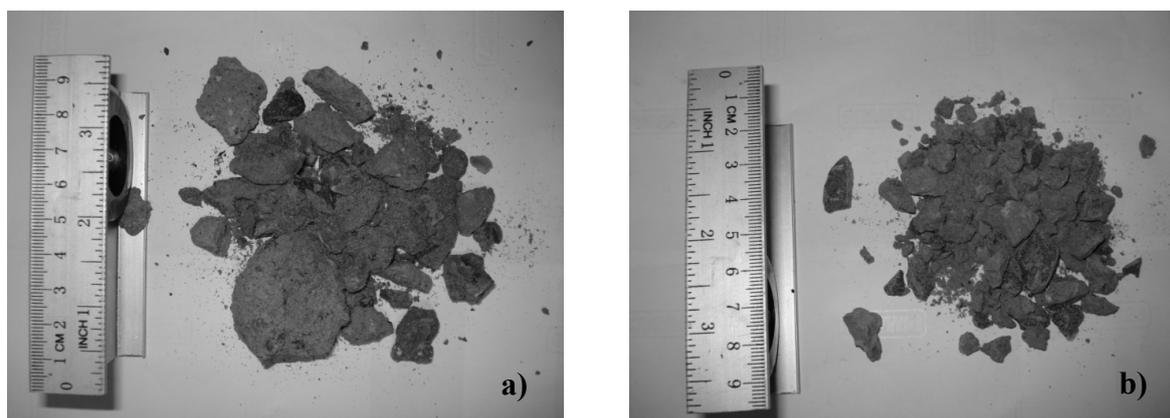
Parâmetro	Especificação
Abertura	100x60 (mm)
Tamanho máximo de alimentação	45 (mm)
Abertura de descarga	6-10 (mm)
Capacidade de produção	230-400 (kg/h)
Velocidade de rotação	1400 (rpm)

Antes de levar o material até o laboratório de Geocronologia para britagem, foi feita uma segunda triagem, retirando pedaços de madeira, plástico e ferro que ainda estavam presentes no resíduo. A Figura 3-4 ilustra estes materiais.



**Figura 3-4.** Triagem de materiais contaminantes: a) madeira, b) plásticos, c) ferro

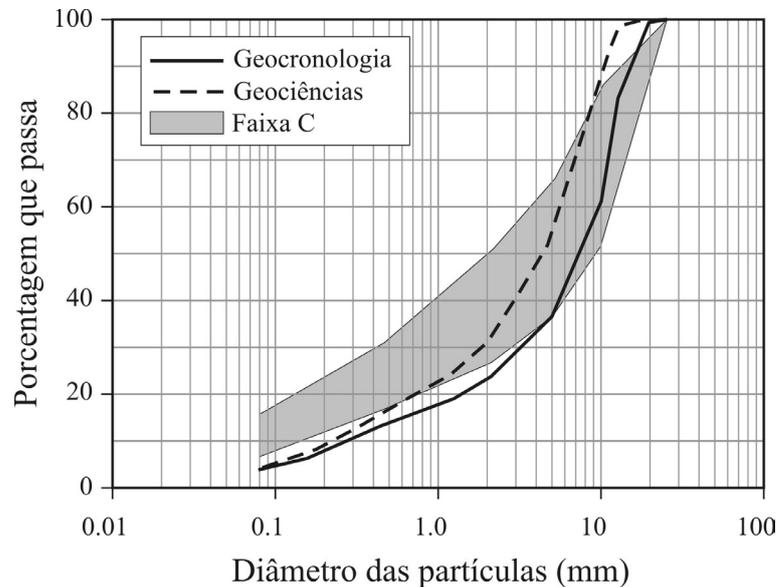
Na Figura 3-5, são apresentados os materiais obtidos após da britagem tanto no laboratório de Geocronologia, quanto no laboratório de Geociências. Mediante inspeção visual, foi verificado que o material britado no laboratório de Geocronologia (Figura 3-5a) tem um tamanho de grão maior que o material britado no laboratório de Geociências (Figura 3-5b).



**Figura 3-5.** RCD após do segundo processo de britagem. **a)** amostra laboratório de Geocronologia; **b)** amostra laboratório de Geociências.

Uma análise granulométrica por peneiramento foi feita sobre as amostras referidas. A Figura 3-6 apresenta as curvas médias obtidas para cada amostra. O ensaio confirmou que o tamanho das partículas das amostras britadas no laboratório de Geociências era menor pelo que se definiu que a totalidade do RCD seria britado no laboratório de Geocronologia.

As curvas granulométricas obtidas permitiram definir a faixa granulométrica sobre a qual seriam feitos todos os ensaios da pesquisa sendo essa a faixa C da especificação de serviço (DNER-ES 303/97).



**Figura 3-6.** Distribuição granulométrica do RCD após da britagem no laboratório de Geocronologia

Aproximadamente 1600 quilos de material com tratamento primário foram transportados até o laboratório de Geocronologia. A Figura 3-7 apresenta o processo de trituração secundária do material. Após britagem, o RCD foi colocado em sacos de 16 quilos e levados de volta ao LER.



**Figura 3-7.** Processo de britagem secundário

### 3.2 HOMOGENEIZAÇÃO E AMOSTRAGEM

Após da britagem o material foi misturado até conseguir uma homogeneidade granulométrica aparente e colocado em sacos plásticos com um peso aproximado de 16 quilos cada e que foram consideradas amostras representativas do RCD. Antes de começar os ensaios de

caracterização, as amostras foram secas ao ar até atingir a sua umidade higroscópica. Durante o processo de secagem, o material foi cuidadosamente misturado com o intuito de gerar amostras homogêneas e evitar perda de finos. A Figura 3-8 ilustra os dois processos expostos anteriormente.



**Figura 3-8.** Processo de armazenamento e secagem do RCD

### **3.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA**

Os ensaios de caracterização física e mecânica foram desenvolvidos no LER e no laboratório de Geotecnia da UnB, utilizando normas de ensaio nacionais e internacionais como as ABNT-NBR, DNER, ASTM, AASHTO e BS.

#### **3.3.1 Materiais Constituintes do RCD**

A metodologia de ensaio empregada para conhecer os materiais constituintes do RCD estudado foi adotada da pesquisa de Motta (2005). Foram selecionados 13 quilos de material seco os quais foram misturados para homogeneizar a amostra e posteriormente submetidos a peneiramento visando separação dos tamanhos grãos ( $1'' - N^{\circ}4$ ), dos miúdos ( $N^{\circ}4 -$  fundo), as peneiras usadas para a separação do material foram: 25.4 mm ( $1''$ ), 19.0 mm ( $3/4''$ ), 12.5 mm ( $1/2''$ ), 9.5 mm ( $3/8''$ ), 4.75 mm ( $N^{\circ}4$ ), 2.0 mm ( $N^{\circ}10$ ), 0.425 mm ( $N^{\circ}40$ ), 0.075 mm ( $N^{\circ}200$ ) e fundo ( $< 0.075$  mm).

Uma vez separado o material por tamanho, a classificação visual dos diferentes materiais encontrados na sua composição foi facilitada. Inicialmente o material foi separado de forma manual e dividido nas seguintes classes: materiais cimentícios (concreto e argamassa); materiais pétreos (britas e seixos rolados); cerâmicos vermelhos (telha e tijolo); cerâmicos brancos (azulejos e pisos); contrapisos; materiais contaminantes (telhas de amianto,

gesso, madeira, aço e arame). Os materiais que passaram na peneira N°4 (4.75 mm) foram classificados como finos e não foi possível a separação manual desses.

### **3.3.2 Distribuição Granulométrica do RCD**

De acordo com Lambe & Whitman (2002), o tamanho de uma partícula, que não tenha forma esférica ou cúbica, não pode ser definido unicamente por uma dimensão linear. O significado do tamanho depende, portanto, da dimensão medida e do método de medição. Os métodos habituais para determinação dos tamanhos das partículas que constituem um solo são a análise granulométrica (partículas maiores a 0.075 mm) e análise por sedimentação para partículas menores. Na análise por sedimentação, o tamanho de uma partícula é o diâmetro de uma esfera que se deposita na água na mesma velocidade que a partícula considerada (Lambe & Whitman, 2002). No ensaio de análise granulométrica cada peneira tem uma abertura característica e tal abertura nominal representa um diâmetro equivalente da partícula. O peso do material que passa em cada peneira, referido ao peso seco da amostra, é considerado como a “porcentagem que passa”, sendo representado por um gráfico mono-log em função da abertura da peneira. A curva de distribuição granulométrica mostra tanto o tamanho das partículas presentes em um solo como a distribuição de partículas dos diferentes tamanhos. Essa distribuição tem uma influência direta na forma com que os vazios do solo serão ocupados pelas partículas sendo que um material granular bem graduado apresentará menor índice de vazios e mais entrosamento entre grãos, gerando um maior ângulo de atrito macroscópico.

Tendo em vista o interesse da pesquisa ser a aplicação do agregado reciclado como material de base para pavimentos, a análise granulométrica do RCD foi feita somente por peneiramento seguindo os procedimentos descritos na norma DNER-ME 080/94. Um total de seis curvas granulométricas foram obtidas, e com elas foi possível conhecer o diâmetro máximo nominal do agregado do RCD, classificá-lo como agregado pedregulhoso, arenoso ou fino, assim como os coeficientes de curvatura e uniformidade do material. Definiu-se também em qual das faixas granulométricas propostas pelo DNER na norma ES 303/93, o material era melhor enquadrado. A Tabela 3–3 apresenta as diferentes faixas granulométricas que podem ser usadas para bases estabilizadas, em função do número de tráfego N.

**Tabela 3–3.** Faixas granulométricas para base estabilizada granulometricamente (DNER-ES 303/97)

Tipos	N>5x10 <sup>6</sup>				N<5x10 <sup>6</sup>		Tolerâncias
	A	B	C	D	E	F	
Peneiras	% em peso passando						
2”	100	100	-	-	-	-	±7
1”	-	75-90	100	100	100	100	±7
3/8”	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	±7
Nº4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	±5
Nº10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	±5
Nº40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	±2
Nº200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	±2

### 3.3.3 Teor de Materiais Pulverulentos

Materiais pulverulentos são partículas minerais com dimensão inferior a 0.075 mm, inclusive os materiais solúveis em água, presentes nos agregados. No geral a presença desses materiais é indesejável na constituição do concreto. Um agregado com alto teor de materiais pulverulentos diminui aderência do agregado a pasta ou argamassa, prejudicando de forma direta a resistência do concreto caso esse seja produzido com alto índice de material pulverulento. O ensaio é mais aplicado em avaliação de concretos, mas, quando o RCD é usado na produção de concretos rígidos, que irão receber um grande desgaste devido à tráfego constante, é necessário que o teor de materiais pulverulentos seja inferior a 3%. A determinação do material pulverulento dos agregados graúdos e miúdos de RCD se fez mediante o procedimento descrito na norma DNER-ME 266/97.

Para a realização do ensaio a amostra de agregado deve ser seca em estufa a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ . As massas do material são selecionadas segundo a dimensão máxima característica do agregado como apresentado na Tabela 3–4.

**Tabela 3–4.** Massa mínima requerida para a determinação de material pulverulento

Dimensão máxima característica do agregado (mm)	Massa mínima por amostra de ensaio (kg)
< 4.75	0.50
4.75 < 19.00	3.00
> 19.00	5.00

Após determinar o peso da amostra de ensaio, essa é colocada num recipiente metálico e a seguir é coberta com água. Com ajuda de uma haste mexe-se o material sem provocar abrasão a fim de que os materiais mais finos se soltem das partículas maiores. A água deve ser despejada através das peneiras, 1.2 mm e 0.075 mm, e o processo deve ser realizado até que a água da lavagem fique limpa. Finalizando o processo, o material deve ser colocado em estufa a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  até atingir peso constante, e finalmente o peso final do material deve ser

determinado. O teor de material pulverulento será a média aritmética do resultado obtido entre duas amostras. A equação para o cálculo é dada por:

$$TP = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad (3.1)$$

em que:

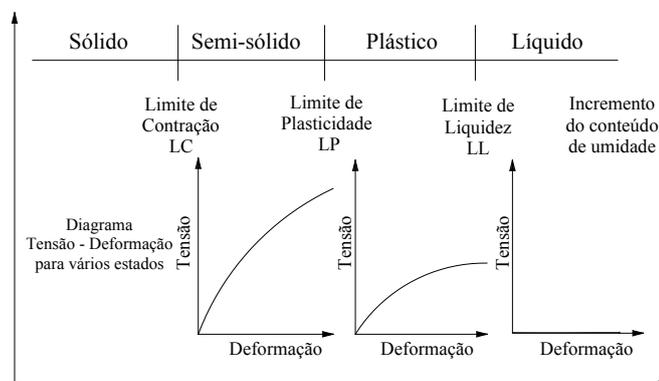
TP = teor de material pulverulento;

$W_i$  = peso inicial da amostra;

$W_f$  = peso final da amostra.

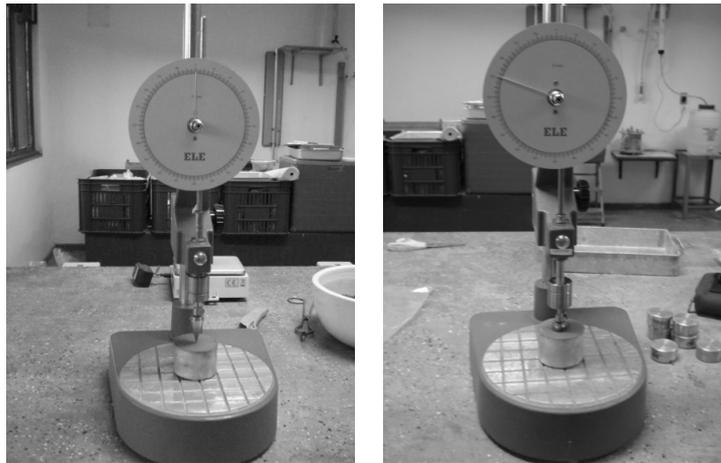
### 3.3.4 Limites de Atterberg

De acordo com Das (2006), quando argilo minerais estão presentes em solos fino granulares eles podem ser remodelados na presença de água sem apresentar desagregação. Essa natureza coesiva se apresenta devido à água adsorvida ao redor das partículas de argila. No início do ano 1900 o cientista sueco chamado Atterberg desenvolveu um método para descrever a consistência dos solos fino granulares segundo a variação do teor de umidade. Assim o solo, quando tem pouca água, é semelhante a um sólido; por outro lado quando o teor de umidade é alto, o solo e a água apresentam comportamento aproximado ao de um fluido. Consequentemente Atterberg definiu quatro estados do solo dependentes da sua capacidade de reter água, os quais se relacionam da seguinte forma: a quantidade de água em porcentagem que o solo precisa para passar do estado sólido a semi-sólido está definida como o limite de contração; a quantidade de água necessária para que o solo passe do estado semi-sólido ao estado plástico se define como limite de plasticidade e, finalmente, a quantidade de água que um solo fino granular precisa para passar do estado plástico ao estado líquido se define como limite de liquidez. A Figura 3-9, apresenta os quatro estados básicos do solo definidos por Atterberg.



**Figura 3-9.** Limites de Atterberg. Modificado de (Das, 2006)

Dentro desta pesquisa, se fizeram os limites de liquidez e de plasticidade. No limite de liquidez, o procedimento de ensaio utilizou a norma britânica BS 1377-2/90 que prescreve o uso de um cone de penetração com ângulo e peso padronizado (ver Figura 3-10) em substituição ao uso do aparelho de Casagrande para determinar a umidade na qual o solo começaria a fluir. O ensaio de limite de plasticidade foi feito mediante o procedimento da norma DNER-ME 082/94.



**Figura 3-10.** Equipamento: cone de penetração para o ensaio de limite de liquidez

### 3.3.5 Absorção do Agregado Reciclado De RCD

A absorção é uma das propriedades prioritárias para o uso do material granular na composição de estruturas de pavimentos, uma vez que a quantidade de água presente nas misturas pode variar dependendo da capacidade de retenção de água do material selecionado. Para Tam *et al.* (2008) os RCD têm baixa densidade, o que resulta de uma alta porosidade, sendo necessária maior quantidade de água para atingir sua saturação total durante a mistura do concreto, provavelmente requerendo-se maior energia de compactação.

O procedimento adotado para a realização do ensaio de absorção sobre o agregado de RCD graúdo se encontra na norma DNER-ME 081/98. Esse ensaio fornece o aumento percentual de massa que o agregado sofre devido ao preenchimento por água de seus vazios permeáveis, em relação à massa seca. O valor da absorção é obtido mediante a expressão:

$$a = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_s} \quad (3.2)$$

em que:

a = absorção;

$M_s$  = massa, ao ar, do agregado seco em estufa;

$M_{sss}$  = massa, ao ar do agregado na condição saturada superfície seca.

### 3.3.6 Massa Específica e Densidade dos Agregados Graúdos e Miúdos que Compõem o RCD

A densidade aparente é definida como a razão entre o peso ao ar da unidade de volume de um agregado (porção impermeável), a uma dada temperatura e o peso ao ar da massa de igual volume de água destilada, livre de gases, à mesma temperatura (Souza, 2010). O cálculo da densidade aparente do agregado graúdo é dado por:

$$D_{ap} = \frac{M_s}{M_{sss} - M_{sub}} \quad (3.3)$$

em que:

$D_{ap}$  = densidade aparente;

$M_s$  = massa, ao ar, do agregado seco em estufa;

$M_{sss}$  = massa, ao ar, do agregado na condição saturada superfície seca;

$M_{sub}$  = massa submersa do agregado

O procedimento de ensaio para a obtenção da densidade aparente do RCD encontra-se descrito detalhadamente na norma de ensaio DNER-ME 081/98. A Figura 3-11 apresenta as diferentes etapas do RCD durante o ensaio de absorção e densidade aparente.



**Figura 3-11.** Ensaio de absorção e densidade aparente do agregado graúdo de RCD: a) etapa de saturação 24 h; b) massa saturada superficialmente seca e c) massa saturada submersa

No caso da fração fina do RCD, dois métodos de ensaio foram utilizados. Para determinar a massa específica foi utilizado o método do frasco Chapman, descrito na norma DNER-ME 194/98. Nesse método a amostra é formada pelos grãos que passam na peneira de abertura 4.75 mm e ficam retidos na malha de abertura 0.075 mm. O ensaio consiste em colocar uma amostra de 500 g dentro do frasco, o qual contém água destilada até a marca de

200 cm<sup>3</sup>. A leitura do nível atingido pela água no gargalo do frasco indica o volume ocupado pelo conjunto água e agregado, o cálculo da massa específica é dado por:

$$\rho = \frac{500}{L - 200} \quad (3.4)$$

com:

$\rho$  = massa específica real do agregado miúdo de RCD;

L = leitura no frasco Chapman.

Para determinar a densidade real dos grãos, o método de ensaio DNER-ME 084/95 requer 500 g de material passante na peneira 4.75 mm e retido na malha de 0.075 mm, os quais são colocados em um frasco volumétrico (picnômetro) de 500 ml e misturados com água destilada. O conjunto permanece em repouso por 24 horas a fim de permitir a saturação do agregado. Transcorrido esse tempo, o conjunto é colocado em banho Maria até atingir a ebulição da mistura (permanecendo pelo menos 15 minutos) para permitir a retirada completa do ar. Após ebulição o conjunto picnômetro + água + solo deve permanecer em repouso até atingir equilíbrio térmico (Figura 3-12). Atingindo a temperatura ambiente, o picnômetro deve ser completado com água destilada, à temperatura ambiente, até a marca flutuante. O peso do conjunto deve ser registrado. A densidade real dos grãos é a relação existente entre a densidade do material normalizada pela densidade da água a 20°C.



**Figura 3-12.** Ensaio de densidade real dos grãos de RCD

A densidade real do agregado miúdo de RCD é dada pela fórmula:

$$D_{25} = \frac{b - a}{(d - a) - (c - b)} \quad (3.5)$$

em que:

$D_{25}$  = densidade real do agregado miúdo, a 25°C (temperatura do ensaio e da água)

a = massa do picnômetro vazio e seco, em g;

- b = massa do picnômetro mais amostra, em g;  
c = massa do picnômetro mais amostra mais água, em g;  
d = massa do picnômetro cheio de água, em g.

### 3.3.7 Equivalente de Areia

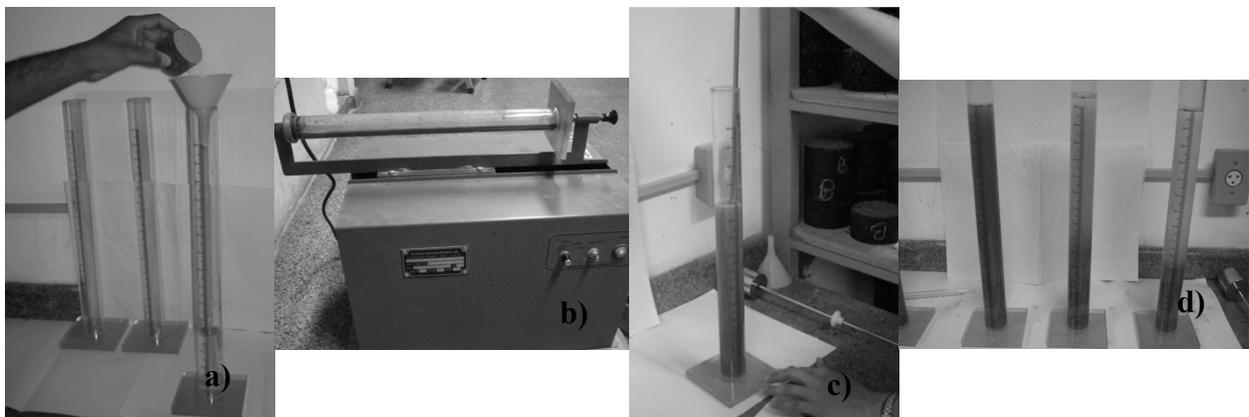
Alguns agregados contêm certos materiais que os tornam impróprios para utilização em estruturas de pavimentação. Dentro desse grupo de materiais encontram-se: vegetação, conchas e grumos de argila presentes sobre a superfície das partículas do agregado graúdo, entre outros (Bernucci *et al.*, 2006). No caso do RCD podem existir partículas de solo que poderiam mudar o comportamento mecânico do material considerado como inerte.

O ensaio de equivalente de areia determina a proporção relativa de materiais tipo argila ou pó em amostras de agregados miúdos. Nesse ensaio, uma amostra de agregado com tamanhos de partículas menor do que 4.75 mm, medida em volume numa cápsula padrão, é colocada em uma proveta contendo uma solução de cloreto de cálcio, e após 10 minutos sob saturação a amostra é misturada durante 45 segundos, com ajuda de um equipamento mecânico. Após tais procedimentos deve-se preencher o conjunto com solução até a marca de 15 in e deixá-lo em repouso por 20 minutos, a fim de permitir a sedimentação e separação entre areia e argila. O equivalente de areia se calcula como:

$$EA = \frac{\text{leitura de areia}}{\text{leitura de argila}} \times 100 \quad (3.6)$$

com: EA = equivalente de areia.

A Figura 3-13 apresenta as diferentes etapas do ensaio começando com a inserção do material na proveta até a leitura da fração argilosa. A descrição detalhada do procedimento de ensaio se encontra na norma ASTM D2419-09.



**Figura 3-13.** Etapas do ensaio de equivalente de areia: a) inserção do material na solução; b) equipamento misturador; c) enchimento de frasco com solução; d) leitura da fração argila

### 3.3.8 Índice de Forma

A forma das partículas dos agregados influi na trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas e muda a energia de compactação necessária para se alcançar certa densidade. Partículas irregulares ou de forma angular, tais como pedra britada, cascalhos e algumas areias de brita, tendem a apresentar melhor intertravamento entre os grãos compactados, sendo maior, quanto mais cúbicas forem as partículas e mais afiladas forem suas arestas (Bernucci *et al.*, 2008). A forma das partículas é caracterizada pela determinação do índice de forma (f) calculado como:

$$f = \frac{P_1 + 0.5P_2}{100n} \quad (3.7)$$

sendo:

f = índice de forma;

P<sub>1</sub> = soma das porcentagens retidas nos crivos I, de todas as frações que compõem a graduação;

P<sub>2</sub> = soma das porcentagens retidas nos crivos II, de todas as frações que compõem a graduação;

n = número de frações que compõem a graduação escolhida.

Para começar o ensaio deve-se conhecer a faixa granulométrica na qual o agregado a analisar se enquadra, que no caso particular desta pesquisa é a faixa C, como citado anteriormente. Para essa faixa usa-se um conjunto de crivos de abertura circular e de crivos redutores definidos na Tabela 3-5.

**Tabela 3-5.** Determinação da graduação do material após análise granulométrica (DNER-ME 086/94)

Graduação	Crivos de abertura circular (mm)		Pesos das frações da amostra	Crivos redutores correspondentes (mm)	
	Passando	Retido		Crivo I	Crivo II
C	19.0	16.0	2000	9.5	6.3
	16.0	12.7	2000	8.0	5.3
	12.7	9.5	2000	6.3	4.2

Nessa pesquisa, o ensaio de índice de forma foi realizado antes e após submeter o RCD ao ensaio de compactação, o procedimento adotado encontra-se descrito na norma DNER-ME 086/94. A Figura 3-14 apresenta o equipamento utilizado para a determinação do índice de forma.



**Figura 3-14.** Equipamento utilizado para a determinação do índice de forma

### 3.3.9 Durabilidade em Sulfato de Magnésio

Alguns agregados que inicialmente apresentam boas características de resistência podem sofrer processos de desintegração química quando expostos às condições ambientais no pavimento. A característica de resistência à desintegração química é quantificada através de ensaio que consiste em atacar o agregado com solução saturada de sulfato de sódio ou de magnésio, em cinco ciclos de imersão com duração de 16 a 18 horas, à temperatura de 21°C, seguido de secagem em estufa a 110°C ± 5°C, até atingir peso constante (Bernucci *et al.*, 2006). Durante o desenvolvimento da pesquisa, um ensaio de durabilidade com sulfato de magnésio foi efetuado sobre RCD. As frações e pesos utilizados são apresentados na Tabela 3-6. O procedimento adotado para a realização do ensaio encontra-se descrito com detalhe na norma ASTM C88-05.

**Tabela 3-6.** Frações e pesos de RCD para o teste de durabilidade em Sulfato de Magnésio

<b>Peneira #</b>	<b>Diâmetro das partículas (mm)</b>	<b>Peso inicial (g)</b>
Agregado graúdo de RCD		
1 ½" – 3/4"	37.5 – 19.0	1500 ± 50
3/4" – 3/8"	19.0 – 9.5	1000 ± 10
3/8" – N4	9.5 – 4.75	300 ± 5
Agregado miúdo de RCD		
3/8" – N4	9.5 – 4.75	100
N4 – N8	4.75 – 2.36	100
N8 – N16	2.36 – 1.18	100
N16 – N30	1.18 – 0.60	100
N30 – N50	0.60 – 0.30	100

### 3.3.10 Resistência ao Desgaste por Abrasão Los Angeles

Durante o processo construtivo de estradas, os agregados estão sujeitos a quebras e abrasão. A abrasão ocorre também durante a ação do tráfego, devendo os agregados apresentar resistência às quebras, degradação e desintegração (Bernucci *et al.*, 2006). No ensaio de resistência à abrasão Los Angeles sobre o RCD, duas amostras foram testadas: uma com a graduação B e outra com a graduação C, segundo o procedimento da norma

DNER-ME 035/98 (Tabela 3-7). Tal procedimento objetiva abranger a totalidade da faixa granulométrica C definida dentro da pesquisa como a faixa de estudo.

**Tabela 3-7.** Definição das condições iniciais para o ensaio Los Angeles sobre RCD

Amostra #	Graduação	Ciclos	Esferas	Peso inicial (g)
1	B	500	11	5000
2	C	500	8	5000

O ensaio consiste em colocar uma amostra de agregado com aproximadamente 5000 g no interior de um cilindro de um equipamento padronizado ver (Figura 3-15a), acrescentando-se um número variado de esferas de aço conforme a granulometria da amostra. As esferas induzem impactos nas partículas durante as suas revoluções. Após do ensaio (Figura 3-15b), o resultado é avaliado pela redução de massa dos agregados retidos na peneira N°12 (12.7 mm) em relação à massa inicial da amostra especificada (Bernucci *et al.*, 2006).



**Figura 3-15.** Ensaio de abrasão Los Angeles: a) equipamento; b) RCD após do ensaio

### 3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

#### 3.4.1 Análise Mineralógica por Difração de Raios X (DRX)

A difração de raios-X (DRX ou X ray diraction XRD em inglês), é um dos métodos mais usados na identificação dos minerais e da estrutura cristalina de solos finos granulares. Os raios-X são úteis para a análise de estruturas cristalinas, pois os comprimentos de onda com valores perto de 1 Å são da mesma ordem que o espaçamento dos planos atômicos em materiais cristalinos (Mitchell & Soga, 2005).

A lei usada para identificar cristais utilizando DRX, conhecida como a lei de Bragg, é dada pela expressão:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (3.8)$$

sendo:

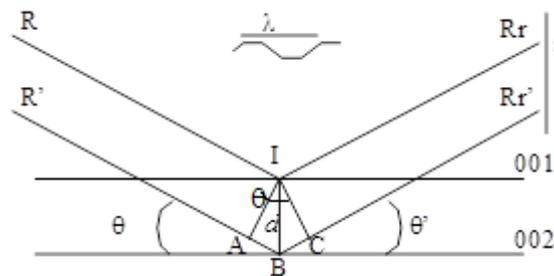
n = ordem de reflexão

$\lambda$  = comprimento de onda;

$d$  = distância interplanar de um dado plano do cristal;

$\theta$  = ângulo de incidência da onda com o plano.

Na Figura 3-16 os planos 001 e 002 são separados por uma distância  $d$ . O raio ( $R$ ) representa a onda de raios-X, com comprimento  $\lambda$ , incidente sobre o plano 001, no ponto  $I$ , segundo um ângulo de incidência  $\theta$ . O raio  $R$  é refletido como  $R_r$ , com o mesmo comprimento de onda  $\lambda$  e um ângulo de reflexão  $\theta'$  igual a  $\theta$  (ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência).



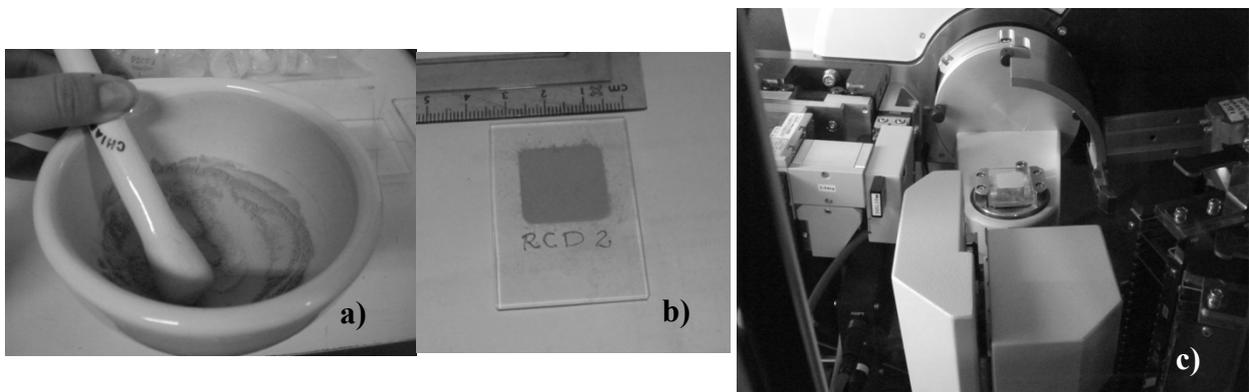
**Figura 3-16.** Geometria da equação de Bragg (Guimarães, 1999)

A onda  $R'$ , paralela a  $R$ , vai incidir sobre o plano 002, no ponto  $B$ , com uma diferença de percurso – em relação a  $RI$  – igual a  $AB$ . Esse segmento é o cateto oposto ao ângulo  $\theta$  do triângulo  $IAB$ , cuja hipotenusa –  $IB$  – é a distância  $d$  entre os planos, ou seja,  $d \sin \theta = AB$ . Após incidir em  $B$ , a onda difratada  $BRr'$  segue paralela a  $IRr$ , até o detector ( $s$ ), com uma diferença de percurso igual a  $BC$ . Considerando que  $\theta'$  é igual a  $\theta$  tem-se que  $BC$  é igual a  $AB$ . Portanto, a diferença de percurso total de  $RIRr$  e  $R'BRr'$ , até o detector ( $s$ ) correspondente à soma  $AB+BC$ , ou  $2AB$ . Pode-se então assumir que a distância percorrida a mais pelo raio incidente em 002 é  $\Delta_{R'BRr'} = 2d \sin \theta$  (Guimarães, 1999).

Ao incidir no detector, as ondas difratadas  $IRr$  e  $BRr'$  podem estar em fase, ou fora de fase. No primeiro caso, as ondas se reforçam e o detector enviará os sinais elétricos que serão registrados no difratograma, como picos. Quando fora de fase, as ondas provocam interferência ou se anulam, não sendo produzido nenhum pico. Para que as ondas estejam em fase ao atingir o detector, a diferença de percurso -  $\Delta_{R'BRr'}$  - deve ser igual a um número inteiro de comprimento de onda, ou seja  $n\lambda = \Delta_{R'BRr'}$ . Considerando que os comprimentos de onda são constantes e que as distâncias -  $d$  - para o mesmo conjunto de planos são as

mesmas, os picos serão produzidos quando a equação (3.8) for satisfeita com o ângulo  $\theta$  adequado (Guimarães, 1999).

O ensaio de difração de raios X foi feito no laboratório de Mineralogia e Petrografia da UnB, em um difratômetro da marca Rigaku-D/MAX-2<sup>a</sup>A/C. O procedimento foi aplicado sobre três amostras de RCD na fração fina (< 0.075 mm). O filtro usado para os ensaios foi de níquel com tubo de cobre. Foi aplicada uma radiação  $K\alpha$  (1.54Å), correspondente ao comprimento de onda do cobre (Cu). A amplitude angular usada foi de  $2\theta$  com um intervalo de medida entre  $3^\circ$ - $80^\circ$  e uma velocidade de  $0.05^\circ/\text{min}$ . A Figura 3-17 apresenta as diferentes etapas de ensaio.



**Figura 3-17.** Preparação de amostras de RCD para ensaio de DRX: a) trituração da amostra; b) montagem em placa de vidro; c) amostra dentro do difratômetro

### 3.4.2 Ensaio de pH

Por definição o pH é calculado como  $-\log_{10}H^+$ , sendo  $H^+$  a concentração de prótons. Se o  $pH < 7$  o meio é ácido ou seja existe uma alta concentração de prótons ( $H^+$ ) e se o  $pH > 7$  o meio é básico, o que disse implica em uma baixa concentração de prótons ( $H^+$ ) (Mitchel & Soga, 2005). O pH é uma medida operacional, isto é, define-se em função de duas medições de forma eletromotriz, empregando sucessivamente uma solução padrão e uma a ser analisada à temperatura constante. Santos (2004) disse que em função de seus valores de pH o solo pode ser classificado como: solo ácido, pH menor que 5.5; moderadamente ácido, com pH entre 5.5 e 6.4; praticamente neutro, com pH variando de 6.5 a 6.9; neutro, com pH igual a 7.0; e alcalino, com pH maior que 7.0.

O pH influencia significativamente a solubilidade de alguns elementos como o ferro e o alumínio. A carga elétrica das partículas coloidais varia com o pH, influenciando de forma notável nos fenômenos de absorção e trocas iônicas, e nos fenômenos de dispersão e floculação (Santos, 2004).

Segundo o reportado por Santos (2004) a diferença aritmética entre os valores positivos de pH em KCl e em água é representada por  $\Delta\text{pH}$ . Um valor positivo em  $\Delta\text{pH}$  indica o predomínio de óxidos de ferro e alumínio, enquanto que valores negativos relacionam-se com a predominância de argilas de sílica. O  $\Delta\text{pH}$  negativo indica que a quantidade de alumínio trocável é elevada; quando positivo, indica que é baixa.

Os ensaios de pH foram feitos sobre amostras de agregado miúdo (<0.075 mm e 0.075 – 0.425 mm) em soluções água + RCD e KCl + RCD. As medidas de pH sobre as diferentes soluções foram feitas nos intervalos de tempo de 10, 20, 60, 120, 240, 1440, 2880 e 4320 min., após o início do processo de mistura. O procedimento de ensaio encontra-se descrito na norma ASTM D4972 – 01. As soluções sólido líquido foram feitas em relação 1:2, isso é, 20 g de RCD miúdo com 40 ml de água ou KCl.

### **3.4.3 Análise Química**

O ensaio de análise química para os elementos Silica (Si), Cálcio (Ca), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Alumínio (Al), Magnésio (Mg), Sódio (Na) e Potássio (K) foi feito no laboratório de Geoquímica do Instituto de Geociências da UnB. Os elementos foram determinados utilizando os aparelhos de espectrômetro de absorção atômica da marca Perkin Elmer modelo 603 e um espectrômetro de emissão atômica com fonte de plasma da marca *Spectro Analytical Instruments GmbH*, modelo *Spectroflame-Fvmo3*, utilizando nebulizador Meinhard e demais condições operacionais de acordo com as especificações do fabricante.

Para esse ensaio submeteu-se a amostra a uma decomposição por fusão como descrito a seguir. Foi pesada em balança analítica uma massa de  $0.0500 \pm 0.0001$  g da amostra em um cadinho de platina descontaminado. Foram adicionados  $0.1700 \pm 0.0001$  g de metaborato de lítio ( $\text{LiBO}_2$ ). Em seguida, os cadinhos foram levados ao forno mufla a  $950^\circ\text{C}$  por 30 min. Posteriormente, cada cadinho foi transferido para um béquer para digestão com 200 ml de HCl 2 M. O sistema foi deixado sob agitação magnética e em aquecimento brando por 1 h. O conteúdo final foi transferido quantitativamente para um balão volumétrico de 500 ml e estocado em um recipiente plástico devidamente identificado.

### **3.4.4 Fluorescência de Raios X (FRX)**

O ensaio de fluorescência de raios X sobre uma amostra fina (passante na N°200) de RCD foi feito no Laboratório de Catálise (LAB-CAT) da UnB. O procedimento e a descrição da técnica é própria do laboratório e descrita a seguir.

A Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (Energy-dispersive X-ray fluorescence – XRF/EDX) é outra técnica instrumental que serve também para análise da razão Si/Al das amostras desaluminizadas. Mas, ao contrário da técnica de DRX e das análises obtidas por meio dos espectros no infravermelho, o FRX fornece dados quantitativos de Si/Al total do material, enquanto que aquelas duas outras técnicas informam apenas a razão Si/Al de rede (o quanto há de proporção Si e Al por cela unitária) existente. Assim, para essas análises, utilizou-se um espectrômetro de XRF/EDX da Shimadzu, modelo EDX-720, que analisa a faixa de elementos que vai do sódio ( $_{11}\text{Na}$ ) ao urânio ( $_{92}\text{U}$ ), com tubo de raios X com alvo de ródio (Rh). O equipamento detecta linhas de energia  $K_{\alpha}$ ,  $K_{\beta}$ ,  $L_{\alpha}$  e  $L_{\beta}$  de cada elemento presente nas amostras (que esteja na faixa Na-U). Todas as análises foram feitas por meio de um programa do próprio equipamento: EDX software, DXP-700E versão 1.0 (Borges, 2011).

Para gerar os espectros, os catalisadores foram colocados em recipientes cobertos com filme de polipropileno (PP), mas não totalmente lacrados, para que o vácuo pudesse ser feito em seu interior. A Figura 3-18 mostra como os materiais foram acondicionados para essa análise. Utilizou-se, também, atmosfera de vácuo, tempo de 100 s e um colimador de 5 mm. Como as análises foram feitas via método quantitativo, foi necessário desenvolver, previamente, uma curva de calibração baseada na zeólita Y de partida a equação (3.9) apresenta a fórmula química da zeólita referida.



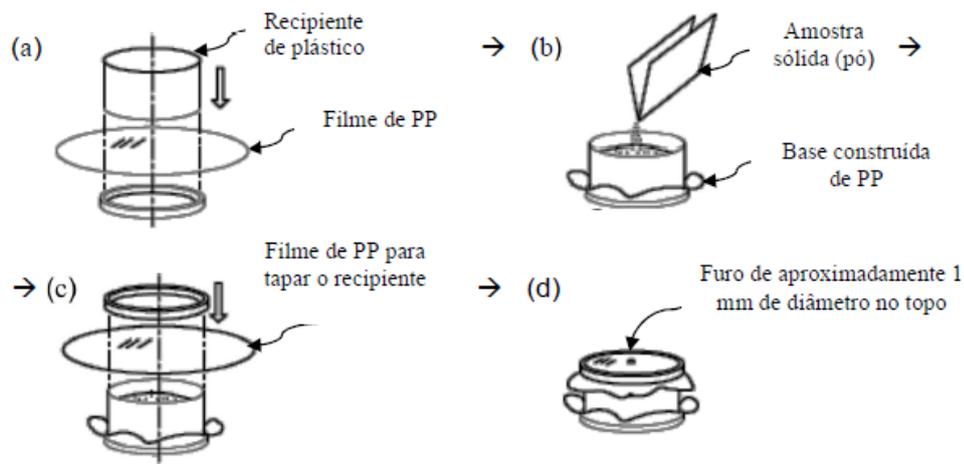
Sendo:

M: cátion de valência n;

N: número de moléculas de água;

Soma de x e y: número de tetraedros por cela unitária.

Para isso, 100 mg de ácido bórico ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) foram utilizados para diluir, no estado sólido, diferentes massas da zeólita Y de partida (100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170 e 180 mg), de forma a gerar diferentes concentrações de Al e Si, as quais foram convertidas em porcentagem de Al e Si para a construção da curva de calibração. A faixa para o mínimo e o máximo de diluição foi escolhida de maneira que as zeólitas menos desaluminizadas (5%) e as mais desaluminizadas (20%) estivessem na curva (Borges, 2011).



**Figura 3-18.** Tratamento das amostras em pó para análise por XRF/EDX em condição de vácuo: (a) base em polipropileno (PP); (b) material preenchendo recipiente; (c) cobertura do recipiente filme de PP, vedando-o com anel de plástico (d) furo para aplicar vácuo (Borges, 2011)

### 3.4.5 Análise Elementar (CHN)

A análise elementar é uma técnica destrutiva utilizada para a determinação das porcentagens de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio sobre amostras em estado sólido e líquido, estáveis ou instáveis sem importar a sua origem. São necessários entre 2 e 4 mg de RCD que são submetidos a oxidação térmica entre 1600-1800°C, em ambiente de Oxigênio (O) conseguindo a conversão total e quantitativa dos componentes de gás carbônico (CO<sub>2</sub>), gás hidrogênio (H<sub>2</sub>) e gás nitrogênio (N<sub>2</sub>).

Análises elementares de carbono, hidrogênio e nitrogênio foram feitas no LAB-CAT e utilizou-se um analisador CHNS da Perkin Elmer (série II, modelo 2400). O equipamento foi ajustado para análise simultânea de carbono, hidrogênio e nitrogênio utilizando a acetanilida como padrão. Como as amostras não haviam sido calcinadas, os cálculos da quantidade de nitrogênio e hidrogênio foram ajustados de forma a considerar a quantidade de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> pré-existente nos materiais.

## 3.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Neste grupo de ensaios encontram-se: compactação Proctor com diferentes energias de compactação, índice de suporte Califórnia (CBR), módulo de resiliência e compressão simples. A descrição da metodologia usada em cada um deles é apresentada nos itens seguintes.

### 3.5.1 Seleção da Energia de Compactação

Apesar de as normas vigentes no país recomendarem uso de energia maior que a normal quando os RCD são selecionados como materiais para pavimentação, durante o desenvolvimento desta pesquisa, ensaios de compactação Proctor nas energias Normal, Intermediária e Modificada foram feitos para se obterem dados sobre o índice de quebra em cada uma dessas energias, e definir em qual delas os corpos de prova para ensaios de módulo de resiliência seriam compactados.

### 3.5.2 Ensaio de Compactação em Laboratório

O ensaio de compactação em laboratório é geralmente usado para determinar a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo do material analisado para uma determinada energia de compactação. No caso da pesquisa além desses dois parâmetros, este ensaio forneceu dados da influência da umidade sobre o RCD quando compactado e da influência das diferentes energias de compactação sobre a mudança da curva granulométrica original. Os ensaios de compactação foram feitos em totalidade no Laboratório de Engenharia Rodoviária (LER), com ajuda de um compactador mecânico (marca ELE) como apresentado na Figura 3-19.



**Figura 3-19.** Compactador mecânico e corpo de prova de RCD após compactação Proctor

Realizaram-se três curvas em cada uma das energias estabelecidas conforme a norma NBR 7182/86. A Tabela 3-8 relaciona o tamanho do cilindro com as características do ensaio e as energias de compactação. Conforme a granulometria do material, todas as curvas da pesquisa foram compactadas no molde grande, segundo especificações da referida norma. O soquete de compactação usado corresponde ao soquete grande com uma massa equivalente a  $4536 \pm 10$  g e altura de queda de  $452 \pm 2$  mm, segundo o disposto na norma.

**Tabela 3–8.** Características do ensaio de compactação

Cilindro	Características do ensaio	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Grande	Soquete	Grande		
	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63.5	63.5	63.5

### 3.5.3 Índice de Suporte Califórnia (CBR)

O ensaio de CBR foi concebido para avaliar a resistência do material frente a deslocamentos significativos impostos por meio de um ensaio de penetração em laboratório. A resistência à penetração do ensaio CBR foi definida com referência a um valor padrão equivalente a 100%. A resistência no ensaio CBR é uma resposta que combina indiretamente a coesão com o ângulo de atrito do material. O CBR é expresso em porcentagem, sendo definido como a relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo de prova de um solo ou material granular e a pressão necessária para produzir a mesma penetração no material padrão de referência.

Para fazer a penetração dos corpos de prova utilizou-se uma prensa Contenco (I-1006-F) com capacidade máxima de 5000 kgf, localizada no laboratório de Geotecnia da UnB. A velocidade de penetração do pistão padrão foi 1.27 mm/min. A Figura 3-20 apresenta a prensa usada para todos os ensaios CBR.



**Figura 3-20.** Equipamento usado na penetração do ensaio CBR sobre RCD

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, foram feitos 6 ensaios de CBR. Três deles foram submetidos a imersão durante 96 horas para medir a possível expansão do material e outros três foram ensaiados imediatamente após compactação.

Os ensaios foram feitos segundo o procedimento da norma ASTM D1883-07. A penetração foi feita por ambas as faces dos corpos de prova a fim de verificar os resultados. Variações no procedimento da norma foram feitas devido ao fato de as energias de compactação da norma ASTM diferirem das energias da norma NBR 7182/86, com relação ao número de golpes aplicados. Essas modificações se apresentam na Tabela 3–9.

**Tabela 3–9.** Compactação dos corpos de prova para ensaio CBR com RCD

	ASTM			NBR*		
	Normal	Intermediária	Modificada	Normal	Intermediária	Modificada
Número de camadas	5	5	5	5	5	5
Número de golpes por camada	10	25	56	12	26	55

\*dados usados para compactação dos corpos de prova para o ensaio CBR com RCD

### 3.5.4 Módulo de Resiliência (MR)

Até a década de 70, os métodos de dimensionamento usualmente empregados no Brasil caracterizavam-se por focar, basicamente, a capacidade de suporte dos pavimentos em termos de ruptura plástica sob carregamento estático, retratada através do valor de CBR. No entanto, observa-se que boa parte da malha rodoviária vinha apresentando uma deterioração prematura, que era atribuída à fadiga dos materiais gerada pela contínua solicitação dinâmica do tráfego atuante. Essa realidade acabou por dar ensejo à introdução de estudos da resiliência de materiais empregáveis em pavimentos, permitindo avaliar comportamentos estruturais até então não explicáveis pelos procedimentos clássicos (DNER, 1996).

A resposta resiliente dos materiais granulares se obtém usualmente pelo módulo de resiliência. Para ensaios triaxiais cíclicos com tensão confinante constante, o módulo de resiliência se define como a relação entre a tensão desvio aplicada repetidamente e a deformação axial recuperável da amostra.

$$MR = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\varepsilon_1} \quad (3.10)$$

em que:

MR = módulo de resiliência;

$\sigma_1$  = tensão principal maior ou tensão axial;

$\sigma_3$  = tensão principal menor ou tensão confinante;

$\varepsilon_1$  = deformação axial resiliente, correspondente a um número particular de repetição da tensão-desvio.

As deformações resilientes são deformações elásticas no sentido de que são recuperáveis. Entretanto, não variam necessariamente de modo linear com as tensões

aplicadas, e dependem de vários fatores que não são considerados no conceito convencional de elasticidade (DNER, 1996).

### **Deformação permanente (PD)**

Se define como a deformação não recuperável durante o descarregamento. Essa deformação se acumula com a repetição de carregamentos e descarregamentos

### **Fatores que afetam o módulo de resiliência**

Existem diversos fatores que afetam o comportamento resiliente dos materiais granulares determinado mediante ensaios triaxiais cíclicos. Como fatores a serem considerados na análise de cada material, têm-se: tipo de agregado e forma da partícula; método de compactação; tensão confinante; massa específica aparente seca máxima; conteúdo de finos; curva granulométrica e tamanho dos grãos; carregamento aplicado, duração e frequência; teor de umidade; tamanho da amostra, com relação entre diâmetro e altura de 1:2; estado e histórico de tensões (DNER, 1996; Kancherla, 2004).

### **Modelo constitutivo usado na obtenção do Módulo de resiliência**

Para prever o comportamento dos materiais granulares submetidos a carregamentos ao longo do tempo, deve-se usar um modelo constitutivo. Para o comportamento resiliente ou elástico, diferentes relações tensão-deformação têm sido propostas. A mais comum é conhecida como modelo volumétrico; em que o módulo de resiliência é função do primeiro invariante de tensão.

$$MR = k_1 \theta^{k_2} \quad (3.11)$$

sendo:

MR = módulo de resiliência;

$\theta$  = soma das tensões principais  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  ou tensão volumétrica;

$k_1$  e  $k_2$  = coeficientes de regressão obtidos dos ensaios de laboratório.

Esse modelo supõe um valor de Poisson constante, porém diferentes pesquisas têm mostrado que o coeficiente de Poisson varia segundo as tensões aplicadas. Outra desvantagem do modelo é a contabilização da tensão no módulo apenas pela soma das tensões principais (Kancherla, 2004).

Para Uzan (1985), o modelo anterior desconsidera o efeito da tensão de cisalhamento e é aplicável somente aos valores de tensão baixos. Uzan (1985) incluiu a tensão desvio na relação anterior pela seguinte expressão:

$$MR = k_1 p_a \left( \frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left( \frac{q}{p_a} \right)^{k_3} \quad (3.12)$$

em que:

- MR = módulo de resiliência;
- $\theta$  = tensão volumétrica;
- $p_a$  = pressão atmosférica;
- $q$  = tensão desvio;
- $k_1, k_2$  e  $k_3$  = coeficientes de regressão.

Ainda Uzan (1999) considera o caso tridimensional, com a substituição da tensão desvio pela tensão octaédrica:

$$MR = k_1 p_a \left( \frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left( \frac{\tau_{oct}}{p_a} \right)^{k_3} \quad (3.13)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \left( \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \right) \quad (3.14)$$

com:

- MR = módulo de resiliência;
- $\theta$  = tensão volumétrica;
- $p_a$  = pressão atmosférica;
- $\tau_{oct}$  = tensão octaédrica;
- $\sigma_1$  = tensão principal maior
- $\sigma_2$  = tensão principal intermediária
- $\sigma_3$  = tensão principal menor
- $k_1, k_2$  e  $k_3$  = coeficientes de regressão.

Finalmente, com o intuito de evitar que o módulo de resiliência seja zero, quando a tensão octaédrica é zero e de obter valores de módulos crescentes com baixos níveis ( $< p_a$ ) de tensão octaédrica, o modelo foi alterado novamente e representado da seguinte forma:

$$MR = k_1 p_a \left( \frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left( \frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (3.15)$$

A equação (3.15) conhecida como modelo universal foi utilizada para calibrar os resultados obtidos mediante o ensaio triaxial cíclico reportados pela presente pesquisa.

### Procedimento de ensaio

Os ensaios de módulo resiliente foram feitos sobre corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. A compactação desses corpos de prova foi feita com a energia intermediária em um molde metálico tripartido (Figura 3-21).



**Figura 3-21.** Molde tripartido e corpo de prova usado na realização de ensaios de módulo de resiliência

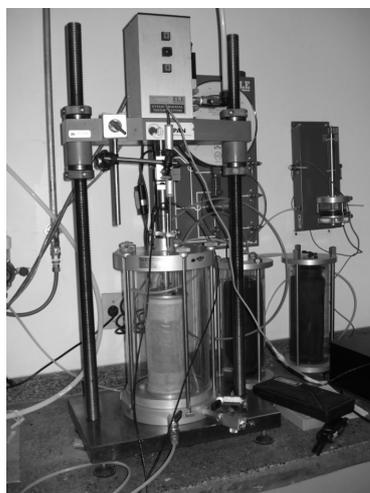
Para garantir a energia de compactação, todos os corpos de prova foram compactados em três camadas de 32 golpes cada, em umidade ótima teórica de 13% e peso específico aparente seco médio de  $17.5 \text{ kN/m}^3$ . A Tabela 3-10 apresenta os dados iniciais do material antes da compactação e dos corpos de prova após compactação.

**Tabela 3-10.** Generalidades do RCD utilizado para os ensaios de módulo de resiliência

<b>Dados do RCD antes da compactação</b>			
Faixa granulométrica	C	Umidade de compactação	13 (%)
Peso seco do material	3500 (g)	Peso por camada	1041 (g)
Peso úmido do material	3124 (g)	# de camadas	3
Energia de compactação	Intermediária	# de golpes por camada	32
<b>Dados do corpo de prova de RCD após compactação</b>			
Diâmetro	99.54 (mm)	Altura	200.21 (mm)
Peso do corpo compactado	3115.3 (g)	Peso específico aparente úmido	$20.0 \text{ (kN/m}^3)$
Peso específico aparente seco	$17.7 \text{ (kN/m}^3)$		

Os ensaios de módulo de resiliência foram feitos na sua totalidade no LER, em uma prensa triaxial cíclica da ELE/IPC Global (Figura 3-22). Os procedimentos adotados para a realização dos ensaios encontram-se descritos de forma detalhada na norma AASHTO T307-99. Uma breve descrição do ensaio se apresenta a seguir. Sobre um corpo de prova cilíndrico, se aplica uma tensão axial cíclica de magnitude fixa; duração do carregamento de 0.1 s e ciclo total de 1.0 s. Durante o teste, a amostra é submetida a uma

tensão dinâmica cíclica e a uma tensão confinante estática com ajuda de uma câmara triaxial. A deformação resiliente (recuperável) total da amostra é medida e usada para calcular o módulo de resiliência.



**Figura 3-22.** Prensa de compressão triaxial cíclica. Laboratório de Engenharia Rodoviária (LER)

O ensaio começa com o pré-condicionamento da amostra mediante a aplicação 500 repetições de uma tensão desvio de 103.4 kPa. O tipo de onda utilizado é Haversine. Começa então uma sequência de carregamentos aplicados em estágios, de forma que tanto a tensão de confinamento ( $\sigma_3$ ) quanto a tensão desvio ( $\sigma_d$ ) são variáveis (Tabela 3–11). Inicialmente a tensão confinante é definida, e a tensão desvio é aumentada. Num segundo momento, a tensão de confinamento é incrementada e a tensão desvio varia. Os valores de módulo de resiliência são calculados para uma tensão desvio e uma tensão confinante específicas.

**Tabela 3–11.** Sequência de carregamentos para materiais de base e sub-base (AASHTO T307-99)

Sequência #	Tensão confinante $\sigma_3$ (kPa)	Máx. Tensão desvio $\sigma_{dmax}$ (kPa)	Tensão cíclica $\sigma_{cíclica}$ (kPa)	Tensão constante $0.1\sigma_{dmax}$ (kPa)	# de carregamentos
0	103.4	103.4	93.1	10.3	500-1000
1	20.7	20.7	18.6	2.1	100
2	20.7	41.4	37.3	4.1	100
3	20.7	62.1	55.9	6.2	100
4	34.5	34.5	31.0	3.5	100
5	34.5	68.9	62.0	6.9	100
6	34.5	103.4	93.1	10.3	100
7	68.9	68.9	62.0	6.9	100
8	68.9	137.9	124.1	13.8	100
9	68.9	206.8	186.1	20.7	100
10	103.4	68.9	62.0	6.9	100
11	103.4	103.4	93.1	10.3	100
12	103.4	206.8	186.1	20.7	100
13	137.9	103.4	93.1	10.3	100
14	137.9	137.9	124.1	13.8	100
15	137.9	275.8	248.2	27.6	100

### 3.5.5 Resistência à Compressão não Confinada (RCS)

Após os ensaios de módulo de resiliência, os corpos de prova que não foram muito danificados pelo teste, foram submetidos a ensaios de resistência à compressão não confinada ou (compressão simples). O ensaio de compressão não-confinada é um tipo especial de ensaio não adensado e não drenado feito normalmente para argilas com a pressão de confinamento  $\sigma_3$  igual a zero. Uma carga axial é aplicada a uma velocidade de 2 mm/min num corpo de prova para causar ruptura. No momento da ruptura, a tensão principal menor total é zero e a tensão vertical será a tensão principal maior é  $\sigma_1$ . Como a resistência não-drenada ( $q_u$ ) é independente da pressão de confinamento, contanto que o solo esteja completamente saturado e completamente não-drenado, tem-se:

$$\tau_f = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{q_u}{2} = c_u \quad (3.16)$$

Ensaio de compressão simples sobre amostras cilíndricas de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura foram feitos. Os corpos de prova testados passaram primeiro por ensaios de módulo de resiliência e a seguir foram levados até a ruptura na compressão não confinada. Uma prensa Contenco (I-1006-F) com capacidade máxima de 50 kN localizada no laboratório de Geotecnia da UnB foi adaptada e utilizada na execução dos ensaios (Figura 3-23).



**Figura 3-23.** Prensa de compressão CBR e Marshal utilizada no ensaio de compressão simples

Os corpos de prova tinham diferentes períodos de cura sendo eles: imediato, 1, 7, 15, 30, 60 e 90 dias. O procedimento de ensaio encontra-se descrito de forma detalhada na norma ASTM D2166-06.

### 3.5.6 Determinação de Atividade Pozolânica com Cimento Portland

Os materiais pozolânicos são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença

de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes. Existem dois grupos de materiais pozolânicos.

As pozolanas naturais são de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (65% de SiO<sub>2</sub>) ou de origem sedimentar com atividade pozolânica.

As pozolanas artificiais se originam de tratamentos térmicos ou subprodutos industriais com atividades pozolânicas. Dentro deste grupo se encontram: argilas calcinadas, cinzas volantes, escórias siderúrgicas ácidas, cinzas de resíduos vegetais, rejeito de carvão mineral, entre outros.

Segundo a norma NBR 12653/92, os grupos de pozolanas se dividem em classes que devem estar em conformidade com as exigências químicas e físicas apresentadas na Tabela 3–12 e na Tabela 3–13. A classificação se divide em:

- Classe N: Pozolanas naturais e artificiais como materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas;
- Classe C: Cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas;
- Classe E: Qualquer outra pozolana que não esteja nas duas classes anteriores e que eventualmente possam apresentar propriedades aglomerantes.

**Tabela 3–12.** Exigências químicas para materiais puzolânicos (NBR 12653/92)

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %mín.	70	70	50
SO <sub>3</sub> , %máx.	4.0	5.0	5.0
Teor de umidade, %máx	3.0	3.0	3.0
Perda ao fogo, %máx	10.0	6.0	6.0
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O, %máx	1.5	1.5	1.5

**Tabela 3–13.** Exigências físicas para materiais puzolânicos (NBR 12653/92)

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira 45µm (325 mm), %máx	34	34	34
Índice de atividade pozolânicas:			
- com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, %mín	75	75	75
- com o cal aos 7 dias, em MPa	6.0	6.0	6.0
- água requerida, %máx	115	110	110

A atividade pozolânica refere-se à quantidade máxima de hidróxido de cálcio com que o material pozolânico pode reagir e a velocidade com que ocorre essa reação. Pozolana + Cal + água geram silicatos e aluminatos de cálcio hidratados.

A atividade pozolânica depende da natureza e proporção das fases ativas presentes na pozolana (composição mineralógica), da relação cal-pozolana da mistura, da finura (superfície específica) da pozolana e da temperatura da reação. Os produtos da reação pozolana/cal geralmente são os mesmos que os produtos de hidratação do cimento Portland: silicatos de cálcio hidratados (CSH), aluminatos de cálcio hidratados (CAH) e sílico-aluminatos de cálcio hidratados (CSAH).

### **Procedimento de ensaio**

A atividade pozolânica das amostras do material foi determinada pelo índice de atividade pozolânica com cimento Portland, de acordo com a Norma NBR-5752/92. Os ensaios foram feitos no laboratório de FURNAS.

Para realização dos ensaios mecânicos, foram preparadas argamassas com dois traços diferentes. A argamassa de controle deve conter somente uma areia padrão e cimento Portland com um traço 1:3 (uma parte de cimento e três partes de areia). Para a argamassa com o resíduo de interesse, foi incorporado teor de 35% de RCD em substituição a parte do aglomerante (cimento).

Os corpos de prova foram moldados utilizando-se moldes cilíndricos com dimensões de 50 x 100 mm (diâmetro, altura) conforme a NBR-7215/97. Após a moldagem os corpos de prova foram mantidos nos respectivos moldes e colocados em câmara úmida à temperatura de  $23 \pm 2$  °C, durante as primeiras 24 horas. Após este período os corpos de prova são desmoldados e colocados em recipientes herméticos que devem assegurar uma temperatura de  $38 \pm 2$  °C durante 27 dias. Após completada a cura, os corpos de prova foram retirados do reservatório e submetidos a ensaios de resistência à compressão não confinada, segundo a norma NBR-7215/97, sendo o resultado apresentado em MPa.

### **3.6 AVALIAÇÃO DA QUEBRA DE GRÃOS DO RCD**

Dois métodos foram empregados na avaliação da quebra de grãos. O primeiro é o método descrito na norma DNER-ME 398/99. Esse método fornece o índice de degradação  $ID_p$  que tem como objetivo analisar o comportamento do material em função do desgaste sofrido durante a compactação Proctor. Ensaios de granulometria foram feitos sobre o RCD, antes e após os ensaios de compactação, CBR e módulo de resiliência.

O índice  $ID_p$  é estabelecido para agregados de rochas naturais e consiste em determinar o deslocamento médio da curva granulométrica da amostra degradada pelo ensaio

de compactação, em relação à amostra inicial. É um parâmetro para avaliação laboratorial do desempenho de materiais compactados (Oliveira, 2007). O valor limite sugerido pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) é de 6%, tendo como referência as rochas naturais. Outra forma de avaliar a quebra dos grãos do material foi mediante o parâmetro  $B_g$ , proposto por Marsal, no qual é utilizado o material que fica retido entre duas peneiras, diferentemente do método do DNER.

### 3.7 GANHO DE RESISTÊNCIA POR CIMENTAÇÃO DOS RCD

Como apresentado no capítulo dois, diversas pesquisas têm mostrado a possibilidade de ganho de resistência para os RCD e os agregados reciclados de concreto (RCA). Isso se deve à capacidade reativa das partículas cimentícias em presença de água. Para verificar a ocorrência desse comportamento nos resíduos provenientes do Mané Garrincha, foram realizados ensaios de módulo de resiliência e compressão não confinada com diferentes períodos de cura (imediate, 1 dia, 7, 15, 30, 60 e 90 dias).

Os corpos de prova foram compactados segundo o descrito no ensaio de MR e envolvidos em papel filme, sendo colocados posteriormente em tubos de PVC de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura e envolvidos novamente em papel filme. Os corpos de prova foram colocados sobre uma grade em um tanque com água em nível inferior ao da grade, visando evitar a perda de umidade dos corpos de prova (Figura 3-24). A temperatura da sala de armazenagem foi de aproximadamente 25°C durante todo o processo de cura.



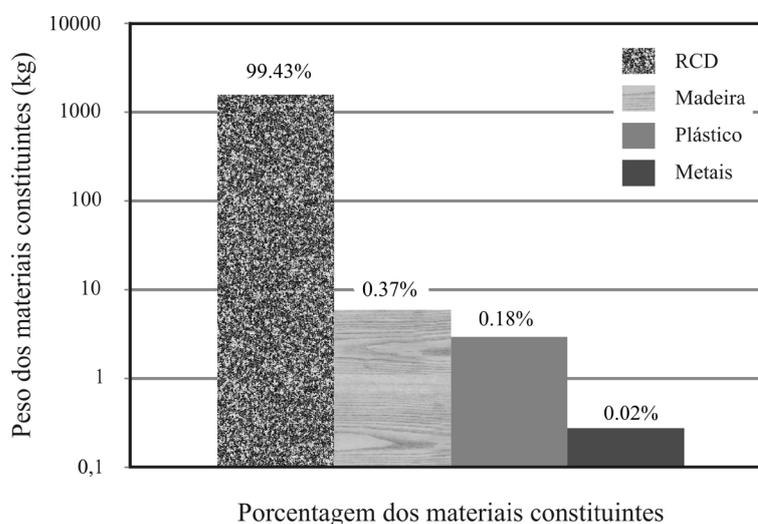
**Figura 3-24.** Procedimento de armazenagem e cura dos corpos de prova de RCD

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

### 4.1 MATERIAIS CONSTITUINTES DO RCD

Para quantificar os materiais que compõem o RCD proveniente do estádio Mané Garrincha, utilizado na pesquisa dois procedimentos foram realizados. O primeiro a nível macro, considerando a amostra total usada na pesquisa, 1609.15 kg de material. O segundo processo foi realizado em escala menor considerando uma amostra de RCD de 13 kg como descrito no item 3.3.1.

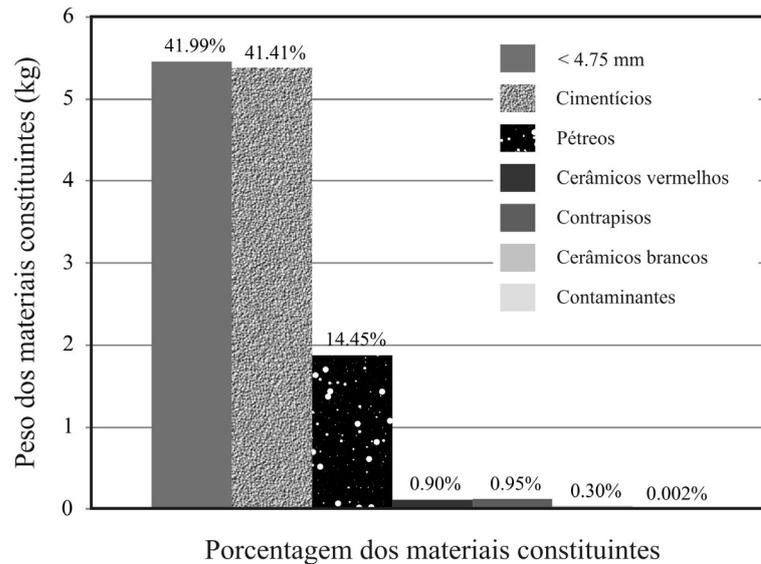
No primeiro nível o material é composto por RCD, madeira, plástico e metal. A Figura 4-1 apresenta as porcentagens dos materiais que compõem a amostra total.



**Figura 4-1.** Composição da amostra total utilizada na pesquisa

Na Figura 4-1 percebe-se que a maior parte do material é composto pelo RCD, correspondendo a mais de 99% do total. A parcela composta por materiais contaminantes é formada por madeira, plástico e metal, constitui apenas 0.56% da amostra. Segundo a norma NBR 15115/04, materiais indesejáveis mistos não podem ser usados na construção de bases granulares, podendo estar presentes no resíduo de construção e demolição sempre que a quantidade total for menor que 3 %. Assim o resultado obtido para a amostra total se enquadrava no valor especificado pela norma.

Na segunda etapa foram considerados materiais cimentícios (concreto e argamassa), materiais pétreos (britas e seixos rolados), cerâmicas vermelhas (telha e tijolo), cerâmicas brancas (azulejos e pisos) contrapisos, materiais contaminantes (telhas de amianto, gesso, madeira, aço e arame), agregados miúdos e finos (materiais menores que 4.75 mm). A representação gráfica do ensaio é apresentada na Figura 4-2.



**Figura 4-2.** Materiais que compõem o RCD segundo a sua natureza

A Figura 4-2 deixa claro que o RCD analisado é composto por 58 % de agregado graúdo e 42 % por materiais finos. É possível observar que os materiais cimentícios (concreto e argamassa) dão a maior contribuição na composição do RCD chegando a 41 %, seguido da brita e seixo rolado com 14 %, e em menor porcentagem encontram-se os materiais cerâmicos vermelhos e contrapisos com aproximadamente 1 % cada, e as cerâmicas brancas com 0.3 %. A porcentagem de materiais contaminantes foi de 0.002 %. Vale ressaltar que dentro do material contaminante quantificado não foram encontrados amianto e gesso.

Com base nestes resultados é possível afirmar que o RCD obtido da demolição do estádio Mané Garrincha analisado nesta pesquisa, não apresenta uma quantidade significativa de materiais indesejáveis e poderia ser usado como agregado para base, uma vez verificadas as propriedades físicas e mecânicas.

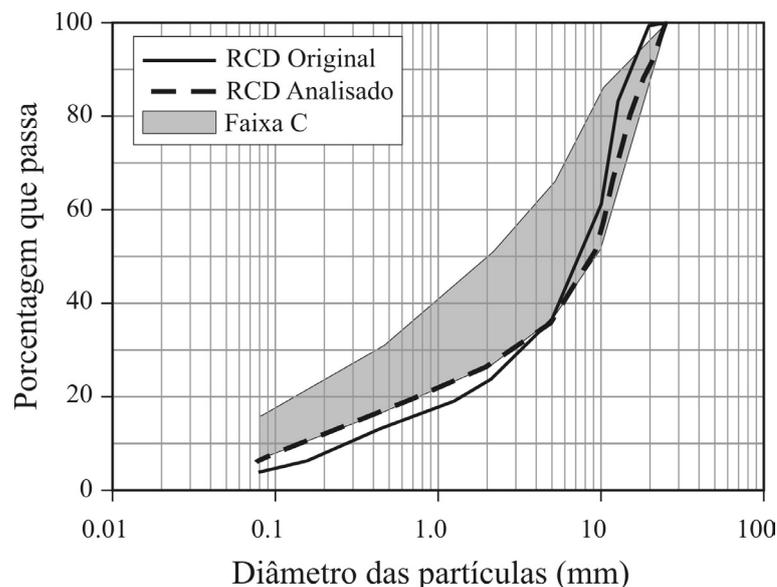
A norma NBR 15116/04 apresenta um procedimento para classificar o RCD em agregado de resíduo de concreto (ARC) e agregado de resíduo misto (ARM), considerando apenas o material retido na peneira N°4 (4.75 mm). No primeiro caso a quantidade de materiais cimentícios (G1) e pétreos (G2) deve ser maior ou igual a 90 %, no segundo, esta quantidade deve ser menor que 90 %. A porcentagem de fragmentos à base de cimento e rochas presentes no RCD analisado na pesquisa é de 96 %, sendo classificado como um agregado reciclado de concreto (ARC). A Tabela 4-1 apresenta as porcentagens de cada material considerado na referida norma.

**Tabela 4–1.** Classificação do RCD segundo NBR 15116/04

Unidades	G1	G2	G3			G4	Total
			Cerâmicas vermelhas	Contrapisos	Cerâmicas brancas		
(g)	5382.4	1878.1	117.0	123.2	39.5	0.2	7540.2
(%)	71.0	25.0	2.0	2.0	1.0	0.003	100.0

#### 4.2 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO RCD

A partir da curva granulométrica obtida Figura 4-3, é possível observar que o RCD original se mantém na maior parte das frações dentro da faixa “C” descrita na norma DNER ES 303/97 – “Pavimentação de base estabilizada granulometricamente”. A curva granulométrica do RCD original é bem graduada, não uniforme, com um coeficiente de uniformidade  $C_u = 49$  e um coeficiente de curvatura  $C_c = 3$ . A porcentagem de material que passa na peneira N°40 (0.42 mm) é 16%. Segundo a norma NBR 15115/04, os agregados reciclados de resíduos de construção civil, devem apresentar valores de coeficiente de uniformidade  $C_u \geq 10$  e uma porcentagem passante na peneira N°40 (0.42 mm) entre 10 % e 40 %. O RCD em análise atende estes valores, sendo apropriado no uso em camadas de base.



**Figura 4-3.** Curva granulométrica do agregado de RCD

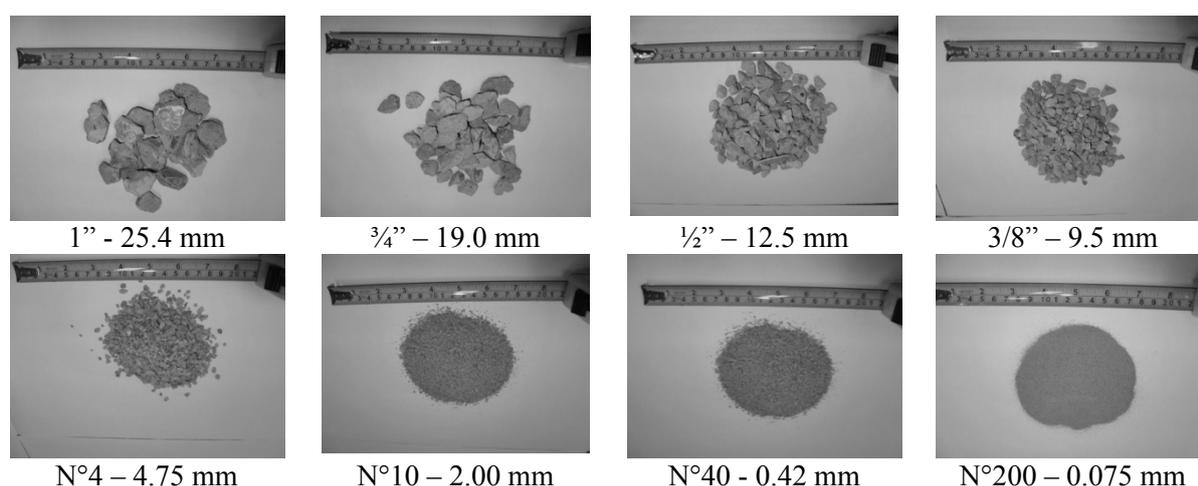
Tendo em conta a expectativa de quebra dos grãos, decidiu-se utilizar uma curva granulométrica no limite inferior da faixa C da norma DNER-ES 303/97. Esta curva é mostrada na Figura 4-3 com a denominação RCD analisado. A curva RCD analisado é bem graduada, não uniforme, com um coeficiente de uniformidade  $C_u = 61$  e um coeficiente de curvatura  $C_c = 5$ . O material passante na peneira N°40 corresponde a 15%, satisfazendo os valores requeridos na norma.

A classificação textural do RCD foi gerada a partir da curva granulométrica. No caso do RCD original, a textura predominante é o pedregulho fino seguido de uma fração arenosa de 41%. Para o RCD analisado a fração composta por pedregulho fino aumenta para 65% e a fração total de areia é de 30%. A Tabela 4-2 apresenta de forma detalhada as classes texturais encontradas no RCD.

**Tabela 4-2.** Classificação textural do RCD

Classe textural	Fração (mm)	RCD original Porcentagem (%)	RCD analisado Porcentagem(%)
Pedregulho médio	25.4 – 19.00	1	0
Pedregulho fino	4.75 – 19.00	54	65
Areia grossa	2.00 – 4.75	15	10
Areia média	0.42 – 2.00	14	10
Areia fina	0.075 – 0.42	12	10
Silte e Argila	0.005 – 0.075	4	5

Para avaliar a quantidade de finos menores que 0.075 mm lavaram-se as frações graúdas e miúdas do RCD sobre a peneira N°200 segundo o recomendado na norma DNER-ME 266/97. O resultado obtido foi de 3% para a fração graúda e de 12% para a fração fina. A norma NBR 15116/04 dentro dos requerimentos estabelecidos para agregados reciclados, define que o teor de material fino passante na malha 0.075 mm, deve ser menor ou igual a 10 % para a fração grossa, e menor ou igual que 15 % para a fina. O RCD usado na pesquisa satisfaz a esses requerimentos. A Figura 4-4 apresenta as diferentes frações do agregado reciclado de RCD analisado nesta pesquisa.

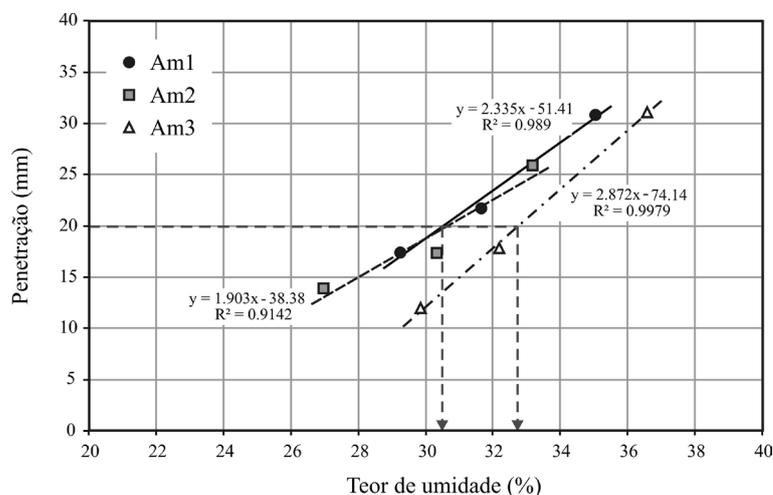


**Figura 4-4.** Composição textural do RCD

### 4.3 LIMITES DE ATTERBERG

Os ensaios de limites de consistência ou limites de Atterberg foram feitos com três amostras de RCD, para a fração passante a peneira N°40. A norma BS 1377-2/90 foi empregada para a

obtenção do limite de liquidez (LL). A umidade média obtida nos três ensaios por regressão linear para uma penetração de 20 mm foi de 32%. A Figura 4-5 é a representação gráfica dos ensaios de limite de liquidez feitos sobre o RCD analisado.



**Figura 4-5.** Ensaio de limite de liquidez por cone de penetração

O ensaio de limite de plasticidade (LP) sobre as mesmas amostras foi feito segundo o procedimento da norma DNER-ME 082/94. O resultado do ensaio não foi definido, por tanto, o material é classificado como não plástico (NP). A Tabela 4-3 apresenta os valores obtidos nos ensaios de limite de liquidez e de plasticidade para cada amostra.

**Tabela 4-3.** Resultado obtido no ensaio de limite de liquidez

Amostra #	Penetração (mm)	LL (%)	IP
Am1	20	31	NP
Am2	20	33	NP
Am3	20	33	NP

Segundo a norma NBR EB-2103/91 quando os valores obtidos para LL e IP ultrapassam 25 % e 6 %, respectivamente, o ensaio de equivalente de areia deverá ser feito e deverá ter um valor superior a 30%. No caso do material analisado nesta pesquisa o valor do limite de liquidez ultrapassa o valor requerido pelo que, o resultado do equivalente de areia será apresentado a seguir.

#### 4.4 EQUIVALENTE DE AREIA (EA)

Para garantir a repetibilidade do ensaio, três testes completos (4 determinações de EA por ensaio) foram feitos e na Tabela 4-4 são apresentados os valores médios obtidos para cada ensaio. Na referida tabela é possível observar que o valor médio de EA é superior a 70%, o que indica baixo conteúdo de material argiloso. Como mencionado no item 4.3 o agregado reciclado de RCD cumpre o valor exigido pela norma a NBR EB-2103/91.

**Tabela 4–4.** Resultado obtido em ensaios de EA para o RCD

Ensaio	Massa RCD (g)	Leitura de argila (mm)	Leitura de areia (mm)	Equivalente de areia (%)
1	110	128.9	97	75
2	110	128.3	91	71
3	110	127.0	93	74

#### 4.5 ABSORÇÃO DO AGREGADO RECICLADO DE RCD

O teor médio de absorção de água obtido para a fração graúda do RCD foi de 7.7 %. Com este resultado foi possível definir os teores de umidade utilizados no ensaio de compactação, considerando como a umidade inicial dois pontos abaixo da absorção (6%) e aumentando de dois em dois pontos até 16% de umidade. A Tabela 4–5 apresenta alguns resultados de teor de absorção encontrados em outras pesquisas com agregados reciclados.

**Tabela 4–5.** Teores de absorção encontrados em diferentes pesquisas com RCD

Tipo de agregado reciclado	Procedência	Teor de absorção (%)	Autor
NE*	Porto Alegre	4.95	Leite (2001)
NE*	Salvador (BA)	8.20	Carneiro <i>et al</i> (2001)
RCA**	São Paulo	7.80	Motta (2005)
RCA**	Hong Kong	3.17 <sup>a</sup>	Poon <i>et al</i> (2006)
RCA**	Grécia	3.00	Oikonomou (2005)
RCA**	Hong Kong	8.93	Tam <i>et al.</i> (2008)
ARC**	Brasília	7.67	Esta pesquisa

\*NE: Não especificado

\*\*RCA-ARC: Agregado reciclado de concreto

<sup>a</sup> amostra com tamanho menor que 0.42 mm

Como pode ser observado na Tabela 4–5, os resultados obtidos por diversos pesquisadores apresentam uma variação significativa. Isso se deve à diferença em composição (heterogeneidade) dos agregados reciclados avaliados. Também é possível observar que os resultados mais próximos ao valor de absorção da presente pesquisa (7.67%), foram obtidos por Motta (7.80%) e Carneiro (8.20%).

Motta (2005) verificou que os teores de absorção em britas são inferiores a 2%. É possível dizer que o agregado reciclado é mais poroso que o agregado natural e por tanto a quantidade de água que deve ser adicionada para a compactação deve ser maior que a dos materiais pétreos convencionais. De outro lado a norma NBR 15116/04 considera que a absorção do agregado reciclado graúdo, destinado ao preparo de concreto sem função estrutural deve ser menor ou igual a 7%, mas não há limite quando o agregado for usado na pavimentação. Isso não descarta a possibilidade de uso do RCD da pesquisa como material de base.

#### 4.6 MASSA ESPECÍFICA E DENSIDADE DOS AGREGADOS GRAÚDOS E MIÚDOS QUE COMPÕEM O RCD

É consenso que tanto a massa específica, quanto a massa unitária dos agregados reciclados geralmente apresentam valores um pouco menores que os apresentados pelos agregados naturais correntemente utilizados na produção de concretos (Leite, 2001).

Três ensaios para cada fração (graúda ou miúda) de RCD foram realizados. Os ensaios para a determinação da densidade do agregado graúdo foram feitos mediante a norma DNER-ME 081/98, e para o agregado miúdo foi obtida com o procedimento da norma DNER-ME 084/95. Finalmente as massas específicas do agregado graúdo e miúdo foram obtidas segundo os procedimentos das normas DNER-ME 195/97 e DNER-ME 194/98 respectivamente. A Tabela 4-6 apresenta os resultados de densidade e massa específica para os agregados graúdos e miúdos que compõem o RCD e o valor desses parâmetros obtidos mediante cálculo da média ponderada considerando a composição granulométrica do material.

**Tabela 4-6.** Densidade e massa específica do RCD

Agregado	Densidade aparente das partículas sólidas (Gs <sub>a</sub> )	Densidade real das partículas sólidas (Gs)	Massa específica aparente $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
Graúdo	2.14	2.71	2.14
Miúdo	2.73		2.38
Média ponderada para RCD*	2.35	2.72	2.22

\* média segundo a composição granulométrica (65% agregado graúdo, 35% agregado miúdo)

Segundo Leite (2001) os resultados de massa específica encontrados na bibliografia são muito variáveis, mesmo para materiais com composição parecida. Este fato pode ser atribuído à própria composição do material, o tipo de beneficiamento realizado, ou a granulometria entre outros fatores que podem interferir na densidade dos agregados reciclados. Outro ponto a considerar é o método utilizado na determinação destas propriedades.

#### 4.7 ÍNDICE DE FORMA

O ensaio de índice de forma se fez segundo o procedimento na norma DNER-ME 086/94, como descrito no item 3.3.8. O resultado do ensaio foi obtido em duas amostras, um antes da compactação e outra após a compactação, ambas com energia Proctor intermediária. A graduação definida para a obtenção do índice de forma para ambas as amostras é a faixa C. Antes da compactação o valor de índice de forma foi  $f = 0.9$  e após a compactação o valor caiu para  $f = 0.8$ . Embora o material apresente um valor menor, pode-se concluir que o RCD

em análise tem uma cubicidade muito boa. Segundo Bernucci *et al.* (2006) o limite superior para o índice avaliado é  $f = 1.0$  quando o material possui uma ótima cubicidade e,  $f = 0.0$  quando o material é lamelar. O valor de aceitação para agregados em quanto a forma é  $f = 0.5$  valor que é superado pelo RCD usado na pesquisa.

#### 4.8 DURABILIDADE EM SULFATO DE MAGNÉSIO

O ensaio de sanidade em sulfato de magnésio foi realizado conforme a norma ASTM C88 – 05, com duas frações de RCD. A parte graúda engloba grãos entre 37.5mm e 4.75 mm, e a miúda, de 4.75 mm até 0.3 mm. A Tabela 4–7 apresenta os dados obtidos do ensaio de sanidade após 5 ciclos de molhagem e secagem em sulfato de magnésio para o agregado graúdo do RCD.

**Tabela 4–7.** Resultado para a fração graúda de RCD no ensaio de durabilidade em sulfato de magnésio

Agregado graúdo		Peso (g)		% inicial	% que retido após ensaio	Perda em (%)
Peneira	Abertura (mm)	Incial	Final			
1	25.4	1015.9	963.1	53.75	48.23	5.5
3/4	19	504.2	401			
1/2	12.5	674.7	655.1	35.54	34.65	0.9
3/8	9.5	330.4	324.7			
Nº4	4.75	302.9	302.9	10.71	10.71	0.0
<b>Totais</b>		<b>2828.1</b>	<b>2646.8</b>	<b>100.00</b>	<b>93.59</b>	<b>6.4</b>

Segundo a referida norma uma avaliação qualitativa deve ser feita sobre a fração graúda. Durante a realização do ensaio, foi evidente que as partículas entre 25.4 mm e 19.0 mm compostas por cerâmicas vermelhas apresentaram a partir do terceiro ciclo um desgaste em forma lamelar. Durante a lavagem final, as partículas afetadas sofreram desintegração total. Na coluna perda em porcentagem da Tabela 4–7 pode-se observar que a maior perda de material foi na fração compreendida entre 25.4 mm e 19 mm chegando a 5.5% o que representa 86% da perda total.

No caso do agregado miúdo foi mais difícil identificar visualmente o dano sofrido pelas partículas. Porém as maiores perdas foram registradas nos materiais com menor diâmetro. As partículas retidas na peneira Nº16 (1.18 mm) apresentaram uma perda de 4.32% equivalente a 39% da perda total. Em ordem de contribuição seguem as malhas Nº30 (0.6 mm) com 2.54% e a Nº50 (0.3 mm) com 2.31%, que equivalem a 23% e 21% da

totalidade de material perdido. A perda total em massa de material após os cinco ciclos de molhagem e secagem chegou a 11% como apresentado na Tabela 4 8.

**Tabela 4–8.** Resultado para a fração fina de RCD no ensaio de durabilidade em sulfato de magnésio

Agregado miúdo		Peso (g)		% inicial	% que retido após ensaio	Perda em %
Peneira	Abertura (mm)	Incial	Final			
3/8	9.5	100.00	98.70	16.63	16.41	0.22
Nº4	4.75	100.40	98.70	16.69	16.41	0.28
Nº8	2.36	100.30	91.10	16.68	15.15	1.53
Nº16	1.18	100.20	74.20	16.66	12.34	4.32
Nº30	0.6	100.30	85.00	16.68	14.13	2.54
Nº50	0.3	100.20	86.30	16.66	14.35	2.31
<b>Totais</b>		<b>601.40</b>	<b>534.00</b>	<b>100.00</b>	<b>88.79</b>	<b>11.21</b>

Segundo a norma NBR EB-2105/91 a durabilidade no sulfato de magnésio para brita deve ser menor que 30%. As normas NBR 15115/04 e 15116/04 que regulam o uso de resíduos de construção e demolição para pavimentação, não reportam valores de durabilidade dos RCD em sulfato de sódio ou magnésio. O valor da durabilidade em sulfato de magnésio obtido para o agregado graúdo de RCD (6%) satisfaz o valor de 30%, requerido na norma NBR EB-2105/91. Para o agregado miúdo não há referência de valor mínimo ou máximo.

#### 4.9 RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR ABRASÃO LOS ANGELES

O ensaio de abrasão Los Angeles foi realizado de acordo o procedimento da norma DNER-ME035/98, utilizando as graduações B e C da especificação como explicado no item 3.3.10. Para cada graduação foram realizados três ensaios, e a média é apresentada na Tabela 4–9.

**Tabela 4–9.** Ensaio de desgaste por abrasão Los Angeles em RCD

Amostra	Graduação	Ciclos	Esferas	Peso inicial da amostra (g)	Abrasão (%)
1	B	500	11	5000	35
2	C	500	8	5000	38

Os valores de desgaste obtidos para o RCD em ambas as graduações, cumprem o requerimento da norma NBR EB-2103/91, onde os materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente devem apresentar uma perda por abrasão Los Angeles inferior a 55%. As normas NBR 15115 e 15116 (2004) não fazem alusão a valor ou faixa de valores limites para esse ensaio.

#### 4.10 ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

A análise por difração por raios X (DRX ou X ray diffraction XRD em inglês) mostra que a fração de RCD estudada contém diferentes quantidades tectosilicatos como o quartzo. Feldspatos alcalinos como a albita não foram encontrados. A presença de micas como a muscovita está relacionada a rochas como o granito, e as cerâmicas vermelhas presentes na composição do RCD. A aparição de carbonatos como calcita se justifica devido a quantidade de materiais cimentícios (concreto e argamassa) presentes no RCD. Filossilicatos como caolinita e em menor quantidade illita e montmorilonita estão presentes devido aos materiais cerâmicos. Materiais indesejáveis como o gesso foi encontrado em pequena quantidade na terceira amostra ensaiada. Os difratogramas obtidos se apresentam nas Figura 4-6 a Figura 4-8.

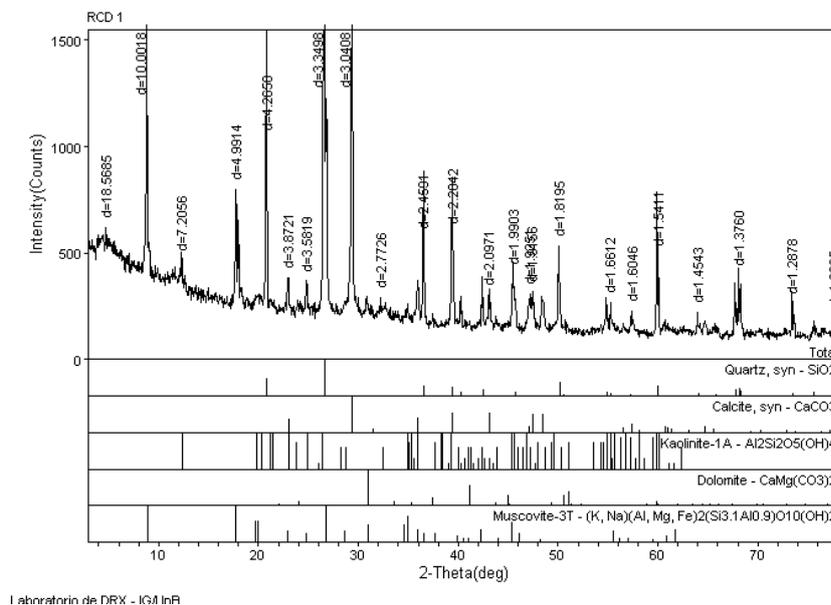


Figura 4-6. Difratograma obtido sobre a amostra RCD1

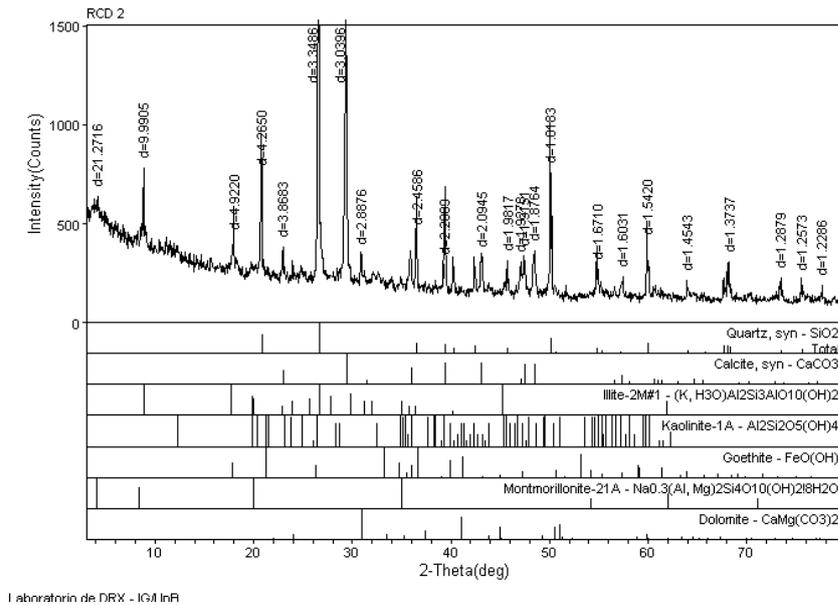


Figura 4-7. Difratoograma obtido sobre amostra RCD2

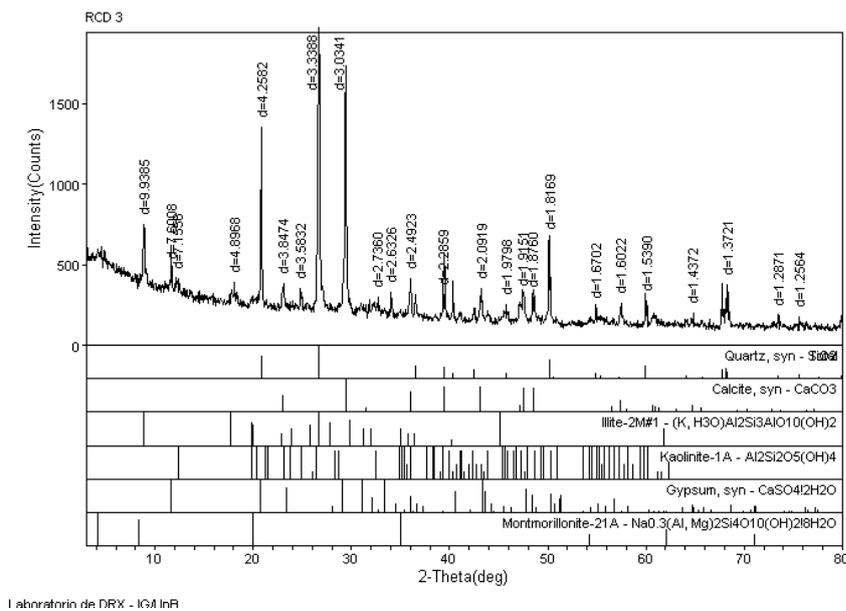


Figura 4-8. Difratoograma obtido sobre amostra RCD3

#### 4.11 ANÁLISE GEOQUÍMICA

A fim de quantificar a quantidade de óxidos minerais presentes no agregado reciclado em análise, um ensaio geoquímico foi feito em uma amostra de RCD fino. Os resultados exibidos na Tabela 4-10 mostram que o material analisado é composto principalmente por óxidos de sílica (38.8%) seguido por óxidos de cálcio (20.6%). Esses valores confirmam a aparição de quartzo e calcita reportados na análise mineralógica por DRX. Os óxidos de alumínio e ferro em menores proporções justificam a aparição da caolinita e a montmorilonita e poderiam ser explicados por uma possível contaminação do RCD com solo da região, embora o solo não

tivesse sido identificado como material constituinte na matriz macroscópica. O elevado valor da perda por calcinação pode estar relacionado à presença de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e carbono (C).

**Tabela 4–10** Óxidos encontrados no agregado de RCD miúdo

Amostra/Elemento	Maiores (%)							Total
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	Perda por calcinação	
RCD	38.78	8.41	3.47	20.57	<LQ	0.83	26.76	99.99
BRANCO	<LQ	0.29	<LQ	<LQ	LQ	LQ	-	-
LQ <sup>a</sup>	1.00	0.10	0.10	0.10	1.60	0.10	-	-

<sup>a</sup>LD = limite de detecção do aparelho; LQ = limite de quantificação do método, LQ = 10xLD

#### 4.12 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)

O ensaio foi feito em uma amostra de agregado reciclado de RCD miúdo (passante na peneira N°200) a fim de conhecer a quantidade de metais existentes no resíduo avaliado. O elemento que aparece com maior frequência no resíduo analisado é o cálcio com 52%, confirmando o que foi observado em nível macroscópico onde os materiais cimentícios aparecem em grande quantidade e em nível microscópico na mineralogia, onde um dos minerais que aparece frequentemente é a calcita. A Tabela 4–11 apresenta os resultados obtidos.

**Tabela 4–11** Análise química quantitativa por FRX

Nome do elemento	Símbolo	% achada	Linha	Int.(cps/uA)
Cálcio	Ca	51.944	CaKa	21.6577
Sílica	Si	23.903	SiKa	6.4201
Ferro	Fe	10.195	FeKa	32.6352
Alumínio	Al	7.857	AlKa	0.8854
Potássio	K	1.93	K	Ka
Titânio	Ti	1.802	TiKa	1.8998
Enxofre	S	0.801	S	Ka
Magnésio	Mg	0.569	MgKa	0.0225
Estrôncio	Sr	0.5	SrKa	7.678
Cobre	Cu	0.161	CuKa	0.8977
Zinco	Zn	0.149	ZnKa	0.9809
Zircônio	Zr	0.088	ZrKa	1.5743
Manganês	Mn	0.081	MnKa	0.2003
Rubídio	Rb	0.021	RbKa	0.2932

Como pode ser observado na Tabela 4–11, em segundo lugar encontra-se a sílica com 24% corroborando o que foi observado na mineralogia composto de quartzo e de traços de argilas como a ilita, montmorilonita e a caolinita. O ferro, alumínio e potássio em menor proporção justificam a presença de minerais como goetita, gibsitita e hematita. A pequena porcentagem de enxofre (0.8%) explica a presença de gesso na última difração apresentada na Figura 4-8.

#### 4.13 ANÁLISE ELEMENTAR CHN

A análise elementar foi realizada sobre uma amostra de agregado fino de RCD (passante N°200). O peso da amostra analisada foi de 4.245 mg e foram detetados valores muito baixos de carbono (3.46%), hidrogênio (0.81%) e nitrogênio (0.21%), porcentagens referidas ao peso. Estes valores indicam a pouca atividade orgânica existente dentro do material analisado, sendo possível defini-lo como material praticamente inerte.

#### 4.14 ENSAIO DE pH

Um ensaio de pH sobre duas amostras correspondentes à fração fina do RCD foi realizado. As leituras em H<sub>2</sub>O e KCl foram feitas durante 72 horas consecutivas após a mistura solução+RCD. A Figura 4-9 apresenta os dados obtidos durante a realização do ensaio.

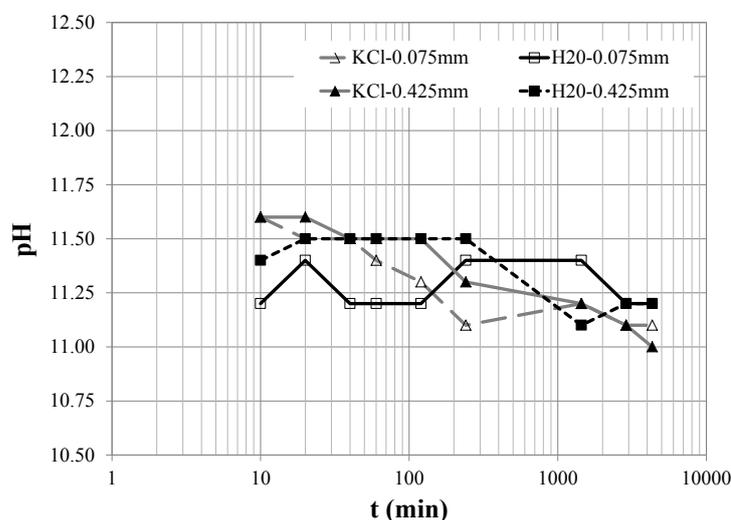


Figura 4-9. Dados obtidos durante o ensaio de pH para o RCD

A Figura 4-9 apresenta a pequena variação do pH durante o período das leituras. Nas leituras feitas na primeira hora de ensaio os pH lidos na solução com KCl foram maiores que os pH da solução aquosa. Depois de 24 horas as leituras feitas nas duas soluções se estabilizaram alcançando valores de pH = 11.2 para ambas as soluções. A mudança do pH ao longo do tempo pode ser observado na Tabela 4-12.

Observa-se ainda que a variação do pH ( $\Delta$ pH) começa positivo e decresce logo após a primeira leitura. Uma vez estabilizado (24 h) o  $\Delta$ pH é negativo o que indica a possível presença de argilas de sílica e de alumínio. Tão asseveração é confirmada com o ensaio de DRX uma vez que todas as amostras analisadas com essa técnica revelaram a presença de argilominerais ricos em sílica e alumínio como a illita, a monmorilonita e a caolinita.

**Tabela 4–12.** Ensaio de pH sobre RCD

t (horas)	t (min)	Passa 40			Passa 200		
		H2O	KCl	$\Delta$ pH	H2O	KCl	$\Delta$ pH
0.17	10	11.4	11.6	0.2	11.2	11.6	0.4
0.33	20	11.5	11.6	0.1	11.4	11.5	0.1
0.67	40	11.5	11.5	0.0	11.2	11.5	0.3
1.00	60	11.5	11.5	0.0	11.2	11.4	0.2
2.00	120	11.5	11.5	0.0	11.2	11.3	0.1
4.00	240	11.5	11.3	-0.2	11.4	11.1	-0.3
24.00	1440	11.1	11.2	0.1	11.4	11.2	-0.2
48.00	2880	11.2	11.1	-0.1	11.2	11.1	-0.1
72.00	4320	11.2	11.0	-0.2	11.2	11.1	-0.1

Segundo Mitchell & Soga (2008) as bases podem alterar os minerais de sílica. A existência de um ambiente com pH alto ( $\text{pH} \geq 12.4$ ), é essencial para alcançar a estabilização de argilas com óxido de cálcio ( $\text{CaO}$  ou  $\text{Ca(OH)}_2$ ) mediante reações pozolânicas onde o silicato de cálcio é hidratado e materiais cimentícios são formados usando a sílica alterada dos minerais argilosos.

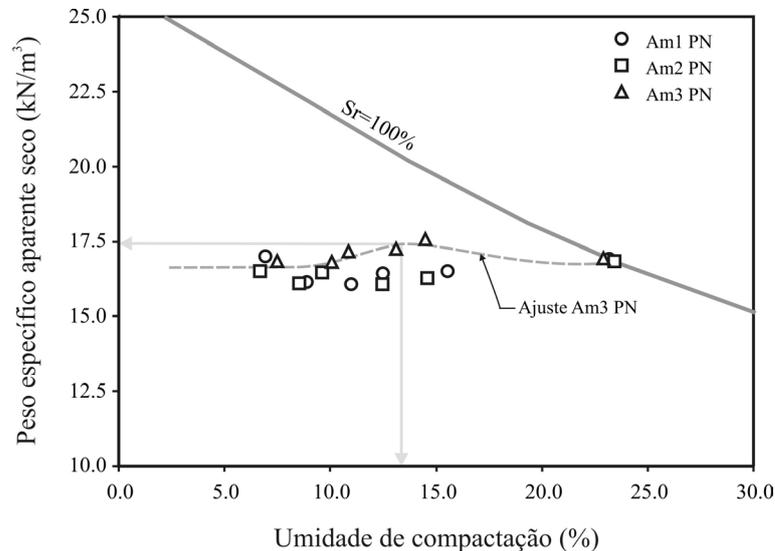
A média de  $\text{pH} = 11.2$  do material analisado, indica um pH básico ou alcalino. Conforme Svehla (1979), os valores de pH maior que 9 geram precipitação de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) ao longo do tempo. Este fator pode explicar a existência do  $\text{CaCO}_3$  no RCD em estudo.

#### 4.15 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO EM LABORATÓRIO

Como descrito no item 3.5.1, foram feitos três ensaios de compactação para cada energia referida na norma NBR 7182. Para definir a umidade inicial do ensaio de compactação foi considerado inicialmente o valor de absorção (7.7%) obtido para o agregado graúdo de RCD a fim de garantir o completo umedecimento do material antes da compactação. Decidiu-se então começar o ensaio de compactação com uma umidade aproximadamente dois pontos abaixo do valor de absorção, 6%, e fazer incrementos de dois em dois pontos até 16%. Acima desta umidade o material ficava com consistência de uma lama o que dificultava a sua compactação, porém um ponto de cada energia foi compactado com uma umidade superior a 20%. As amostras foram compactadas 24 horas após o umedecimento do material.

#### 4.15.1 Compactação com energia Proctor normal

As curvas de compactação obtidas usando a energia normal são mostradas na Figura 4-10. Os três ensaios com energia normal apresentam comportamento semelhante, e os pesos específicos obtidos não apresentam variação significativa com a variação de umidade.



**Figura 4-10.** Curvas de compactação obtidas para energia normal

Os pesos específicos aparentes de cada curva são próximos. Nas curvas para as amostras Am 1 e Am 2 os valores de  $\gamma_d$  variaram entre  $16.0 \text{ kN/m}^3$  e  $16.5 \text{ kN/m}^3$ . A amostra Am 3 apresentou valores de  $\gamma_d$  ligeiramente superiores aos observados nas duas primeiras amostras (Am 1 e Am 2). Uma possível explicação para esta diferença da Am 3 é que nesse ensaio específico mudou-se o operador do equipamento, provocando as alterações no comportamento do material.

Observa-se que no caso da umidade de 23%, o peso específico seco não apresentou redução como era esperado chegando a um valor de  $17.0 \text{ kN/m}^3$ . Esse valor sugere erros no procedimento de compactação ou expressa à dificuldade de compactar amostras no ramo úmido (perto à saturação). Outros parâmetros calculados a fim de verificar o comportamento do material compactado foram os índices de vazios interagregados ( $e_a = 0.38$ ) e o índice de vazios total ( $e = 0.60$ ). As variações dos valores dos índices de vazios calculados não foram significativas, comportamento verificado para cada uma das energias utilizadas como se apresenta na Tabela 4-13. Esta afirmação é baseada em que os coeficientes de variação obtidos, são inferiores aos intervalos reportados na literatura para geomateriais 7-30% (Lacasse & Nadim, 1996).

**Tabela 4–13.** Índices de vazios interagregados e totais para diferentes energias de compactação

	Energia Normal		Energia Intermediária		Energia Modificada	
	$e_a$	$e$	$e_a$	$e$	$e_a$	$e$
Índice de vazios máximo	0.4641	0.6947	0.3453	0.5572	0.3245	0.5330
Índice de vazios médio	0.4299	0.6107	0.4310	0.6563	0.4414	0.6683
Índice de vazios mínimo	0.3822	0.5999	0.2956	0.4996	0.2665	0.4659
Desvio padrão	0.0266	0.0308	0.0362	0.0420	0.0485	0.0562
Coefficiente de variação	0.0619	0.0504	0.1050	0.0753	0.1496	0.1054

Uma análise de variância simples (ANOVA) foi aplicada aos dados obtidos durante o ensaio de compactação com energia normal. A hipótese adotada para a análise foi que todos os pontos pertencem ao mesmo espaço amostral. A Tabela 4–14 apresenta os resultados obtidos desta análise estatística feita. Observa-se que as médias das amostras Am 1 e Am 2 são praticamente as mesmas, mas a média da Am 3 é significativamente diferente.

**Tabela 4–14.** Resultado da análise de variância simples (ANOVA) para a energia normal

## RESUMO

Grupos	Contagem	Soma	Média (kN/m <sup>3</sup> )	Variância	Desvio padrão
Amostra 1	6	99.061	16.5	0.142	0.377
Amostra 2	6	98.236	16.4	0.099	0.314
Amostra 3	6	102.574	17.1	0.091	0.302

## ANOVA

Fonte da variação	Soma dos quadrados (SQ)	Graus de liberdade (gl)	Média dos quadrados (MQ)	F	Probabilidade	Valor crítico F
Entre grupos	1.768	2	0.884	7.988	0.004	3.682
Dentro dos grupos	1.659	15	0.110			
Total	3.428	17				

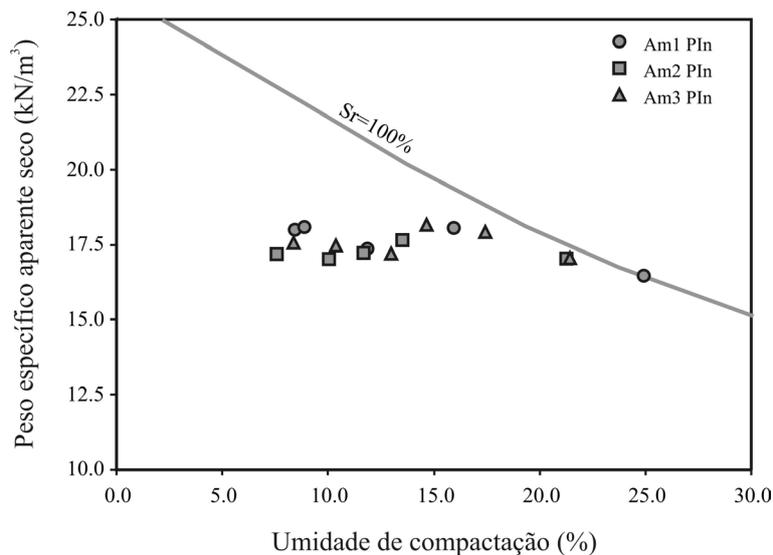
Observa-se que a função Fischer ( $F=7.988$ ) apresenta um valor maior que o valor crítico adotado. Isso indica que a hipótese adotada deve ser rejeitada uma vez que as médias amostrais são significativamente diferentes. Esta análise permitiu determinar que as amostras Am 1 e Am 2 pertencem à mesma classe, mas no entanto os dados da amostra Am 3 não pertencem a essa população confirmando o fato de que a mudança no operador pode alterar significativamente os resultados laboratoriais. Observou-se também que o teor de água utilizada para cada ponto de compactação, não influi no comportamento do material ensaiado, mas, melhora a trabalhabilidade do material.

Embora o agregado reciclado não tenha apresentado o comportamento esperado segundo a teoria convencional de compactação, observações feitas durante os ensaios permitiram definir uma umidade onde o corpo de prova compactado conseguia ter coesão aparente sem desmanchar. Essa umidade foi 13% com um peso específico aparente seco de

16.5 kN/m<sup>3</sup>. Esses dois valores foram adotados como umidade ótima e o correspondente peso específico aparente seco máximo para a energia normal.

#### 4.15.2 Compactação com energia Proctor intermediária

As três curvas obtidas com energia intermediária apresentam forma e comportamento similar com os pesos específicos numa faixa de valores entre 17.0 kN/m<sup>3</sup> e 17.9 kN/m<sup>3</sup>. As variações dos valores de peso específico entre um teor de umidade e outro não são muito grandes como pode ser observado na Figura 4-11. Observa-se um pequeno pico quando a umidade chega perto de 15% sugerindo um peso específico seco máximo. No entanto, nesse teor de umidade o material apresentava água em excesso fazendo que os finos presentes na amostra aderissem ao agregado graúdo. Observou-se que como na energia normal, o melhor comportamento da amostra compactada ocorreu quando o teor de umidade estava perto de 13%, chegando a um peso específico seco de 17.5 kN/m<sup>3</sup>.



**Figura 4-11.** Curvas de compactação obtidas para energia intermediária

Na Figura 4-11 é possível observar que, para um teor de umidade superior a 20%, ocorre uma queda no valor do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ), como esperado quando os materiais encontram-se no ramo úmido. Os índices de vazios calculados para os diferentes pontos obtidos na compactação com energia intermediária não apresentaram variações significativas sendo  $e_a = 0.30$  e  $e = 0.50$ , correspondentes a um peso específico aparente seco de 17.5 kN/m<sup>3</sup>.

Considerando os dados obtidos com a energia intermediária, foi realizada uma análise de variância simples. Observou-se que a função Fischer ( $F=0.719$ ) apresentava um valor menor que 1 e que o valor crítico esperado, o que indica a boa repetibilidade do ensaio.

Também indica que a hipótese adotada pode ser aceita uma vez que as médias amostrais são significativamente similares. Além disso, os resultados mostram que a água usada na compactação não influencia o comportamento do material durante o ensaio, mas, favorece a acomodação das partículas maiores melhorando a trabalhabilidade do material. A Tabela 4–15 apresenta os resultados obtidos com a análise.

**Tabela 4–15.** Resultado da análise de variância simples (ANOVA) para a energia intermediária

RESUMO

Grupos	Contagem	Soma	Média (kN/m <sup>3</sup> )	Variância	Desvio padrão
Amostra 1	7	118.501	16.9	2.936	1.713
Amostra 2	7	121.201	17.3	0.140	0.374
Amostra 3	7	123.164	17.6	0.189	0.435

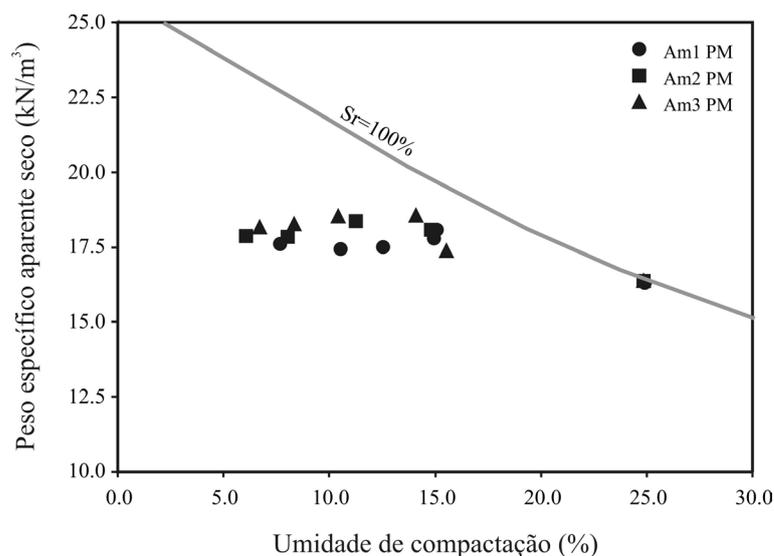
ANOVA

Fonte da variação	Soma dos quadrados (SQ)	Graus de liberdade (gl)	Média dos quadrados (MQ)	F	Probabilidade	Valor crítico F
Entre grupos	1.566	2	0.783	0.719	0.501	3.555
Dentro dos grupos	19.591	18	1.088			
Total	21.157	20				

#### 4.15.3 Compactação com energia Proctor modificada

Os pontos obtidos durante os três ensaios de compactação com energia modificada são apresentados na Figura 4-12. Como observado nas duas energias anteriores, o comportamento do material é diferente do esperado pela teoria convencional da compactação. No entanto, as curvas do material com a energia modificada, além de apresentarem um acréscimo nos valores do peso específico seco em relação às energias anteriores, apresentaram um leve deslocamento para a esquerda. As variações entre os pesos específicos secos encontrados nas três curvas apresentadas na Figura 4-12 não foram significativas e variam de 17.5 kN/m<sup>3</sup> a 18.5 kN/m<sup>3</sup>. Os índices de vazios mínimos obtidos para esta energia de compactação são 0.27 para o interagregado e 0.47 para o índice de vazios total correspondentes a uma umidade de 13% e um  $\gamma_{dmax} = 18.5 \text{ kN/m}^3$ .

A análise de variância simples (ANOVA) feita com os dados obtidos com energia modificada foi coerente com os resultados obtidos para as duas energias anteriores, ou seja, os dados pertencem ao mesmo espaço amostral e a umidade não altera o comportamento do material. A Tabela 4–16 apresenta os resultados obtidos mediante a análise para os dados da energia modificada.



**Figura 4-12.** Curvas de compactação obtidas para energia modificada

**Tabela 4-16.** Resultado da análise de variância simples (ANOVA) para a energia modificada

RESUMO

Grupos	Contagem	Soma	Média (kN/m <sup>3</sup> )	Variância	Desvio padrão
Amostra 1	6	104.660	17.4	0.366	0.605
Amostra 2	6	106.502	17.8	0.540	0.735
Amostra 3	6	107.179	17.9	0.768	0.877

ANOVA

Fonte da variação	Soma dos quadrados (SQ)	Graus de liberdade (gl)	Média dos quadrados (MQ)	F	Probabilidade	Valor crítico F
Entre grupos	0.566	2	0.283	0.507	0.612	3.682
Dentro dos grupos	8.372	15	0.558			
Total	8.938	17				

De uma forma geral pode-se dizer que as curvas de compactação não têm uma curvatura bem definida e, pelo que se observa a olho nu, o teor de umidade não parece afetar o comportamento do material, uma vez que o peso específico aparente seco varia pouco quando aumenta a umidade de compactação. Esse comportamento foi percebido durante todos os ensaios e para todas as energias e dificultou a determinação da umidade ótima e do peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ). A Tabela 4-17 apresenta um resumo dos dados de umidade ótima, peso específico aparente seco máximo e índices de vazios obtidos em cada energia. O peso específico do material solto e o peso específico dos sólidos também é apresentado.

**Tabela 4–17.** Pesos específicos aparentes do RCD em diferentes estados

	Umidade (%)	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	Índice de Vazios interagregados ( $e_a$ )	Índice de Vazios total ( $e$ )
$\gamma_d$ normal	13	16.5	0.38	0.60
$\gamma_d$ intermediária	13	17.5	0.30	0.50
$\gamma_d$ modificado	13	18.5	0.27	0.47
$\gamma$ solto	2	15.0	-	-
$\gamma_{sólidos}$ (kN/m <sup>3</sup> )	-	-	23.5	27.2

Finalmente uma análise de variância simples (ANOVA) foi feita incluindo todos os pontos obtidos nos nove ensaios de compactação e a Tabela 4–18 apresenta os resultados. A hipótese adotada para a análise foi que todos os pontos pertencem ao mesmo espaço amostral. Observa-se que a função Fischer ( $F=7.649$ ) apresenta um valor maior que o valor crítico esperado. Isso indica que a hipótese adotada deve ser rejeitada uma vez que as médias amostrais são significativamente diferentes. Pode-se concluir que a energia de compactação afeta sim o comportamento do material, gerando diferenças entre os pesos específicos sendo maiores quando a energia empregada é a modificada.

**Tabela 4–18.** Resultado da análise de variância simples (ANOVA) considerando diferentes energias

## RESUMO

Grupos	Contagem	Soma	Média (kN/m <sup>3</sup> )	Variância	Desvio padrão
Energia Normal	18	300	16.7	0.202	0.449
Energia Intermediária	18	309	17.2	1.132	1.064
Energia Modificada	18	318	17.7	0.526	0.725

## ANOVA

Fonte da variação	Soma dos quadrados (SQ)	Graus de liberdade (gl)	Média dos quadrados (MQ)	F	Probabilidade	Valor crítico F
Entre grupos	9.48	2	4.74	7.649	0.00124	3.179
Dentro dos grupos	31.60	51	0.62			
Total	41.08	53				

Considerando o comportamento que o material apresentou durante os ensaios de compactação, se observou que a água permite uma melhor acomodação entre partículas melhorando a trabalhabilidade do material.

Independente da energia de compactação empregada, o melhor comportamento do agregado reciclado foi observado com um teor de umidade de 13%, sendo este adotado como valor ótimo e foi utilizado então na compactação dos corpos de prova de CBR e módulo de resiliência.

Diversos trabalhos foram consultados a fim de fazer uma comparação entre os valores obtidos em outras pesquisas similares. Contudo a variabilidade nos valores de umidade ótima, peso específico aparente seco e formato da curva de compactação foram muito grandes. Estas diferenças são possíveis porque diversos fatores determinam o comportamento do agregado reciclado. Esses fatores são: a origem do RCD, a sua composição, granulometria, energia de compactação, quantidade de água utilizada para compactação, entre outros. A Tabela 4-19 apresenta valores de umidade ótima e pesos específicos aparentes obtidos em pesquisas usando agregados reciclados.

**Tabela 4–19.** Umidade ótima e peso específico aparente seco máximo em diferentes agregados reciclados de RCD

<b>Tipo de agregado reciclado</b>	<b>Procedência</b>	<b>Energia Proctor de Compactação</b>	<b><math>\omega_{ot}</math> (%)</b>	<b><math>\gamma_d</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Autor</b>
RCA*	Suécia	Modificada	9.0	20.0	Arm, (2001)
RCA	Coréia do Sul	Modificada	9.0-13.0	18.1-22.1	Park, (2003)
AR** misto	Brasília (Brasil)	Normal	13.5	18.1	Motta & Fernandes (2003)
		Intermediária	16.5	18.2	
		Modificada	12.5	18.4	
ARC	Belo Horizonte (Brasil)	Intermediária	15.0	18.2	Fernandes (2004)
AR Misto		Intermediária	17.0	17.6	
AR cerâmico	Goiânia (Brasil)	Intermediária	20.8	15.8	Oliveira <i>et al.</i> , (2005)
AR concreto		Intermediária	14.5	18.4	
ARCV***	Uberlândia (Brasil)	Intermediária	19	15.6	Dias <i>et al.</i> , (2006)
ARCV		Intermediária	21	16.1	
RCA	São Paulo (Brasil)	Modificada	13.5	17.6	Leite <i>et al.</i> , (2011)
		Intermediária	14.5	18.3	

\*RCA: Agregado reciclado de concreto. \*\*AR: Agregado reciclado. \*\*\* ARCV: Agregado reciclado de telha cerâmica vermelha.

#### 4.16 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (CBR)

Foram realizados ensaios de CBR, com e sem imersão, para as amostras de RCD. Como metodologia de ensaio utilizou-se a norma ASTM D1883/07 com algumas variações como descrito no item 3.5.3. Os corpos de prova foram compactados com energias normal, intermediária e modificada e após compactação foram submetidos à penetração imediata (sem imersão) e a 96 horas de imersão antes da penetração.

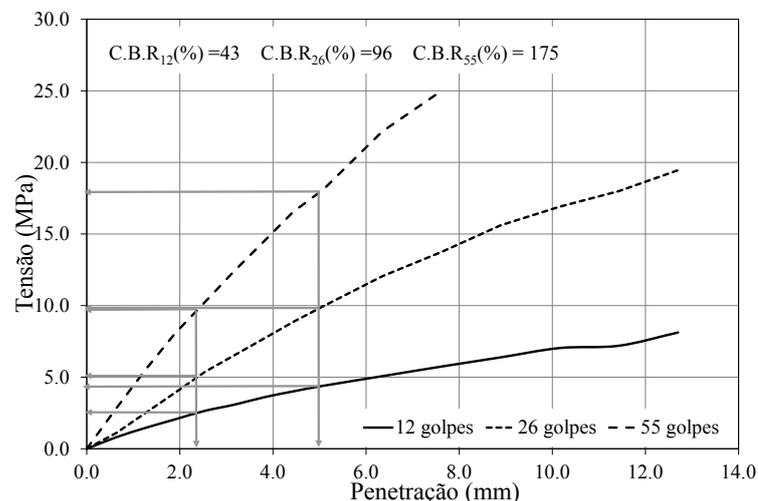
Os resultados obtidos para os ensaios CBR sem imersão são apresentados na Tabela 4–20. Os valores mais baixos foram obtidos quando a energia normal foi utilizada. As normas brasileiras NBR 15115 e 15116 dispõem que o agregado reciclado de RCD pode ser usado como material para execução de reforço de subleito quando esse índice for maior ou

igual a 12%, desde que seja utilizada a energia normal. O valor obtido para este parâmetro com energia normal, supera amplamente o requerimento da norma e poderia eventualmente ser usado em reforço de subleito. Os valores obtidos para as energias intermediária e modificada também superaram os valores mínimos de CBR para agregados reciclados de RCD. Utilizou-se como referência as normas NBR 15115 e 15116, em que o CBR para material de base deve ser maior que 60% quando usada a energia intermediária.

**Tabela 4–20.** Valores de CBR sem imersão

Teste #	Normal (12 golpes)			Intermediária (26 golpes)			Modificada (55 golpes)		
	CBR(%)	w(%)	$\gamma_d(kN/m^3)$	CBR(%)	w(%)	$\gamma_d(kN/m^3)$	CBR(%)	w(%)	$\gamma_d(kN/m^3)$
1	41	13	16.4	92	14	17	140	13	17.5
2	33	13	17	98	14	18.2	173	13	17.7
3	43	13	19.1	96	14	18.4	175	13	18.9
Média	39	13	17.5	95	14	17.9	163	13	18.0
Variância	18.7	0.0	1.3	6.2	0.0	0.4	257.6	0.0	0.4
Desvio padrão	4.3	0.0	1.2	2.5	0.0	0.6	16.0	0.0	0.6

A Figura 4-13, apresenta a variação da resistência à penetração do corpo de prova para diferentes energias de compactação. É evidente que a resistência à penetração do corpo de prova cresce à medida que a energia de compactação aumenta. Isso se deve a que com uma energia de compactação maior, aumenta o intertravamento entre as partículas mais grossas e a geração de partículas menores provocada pela quebra de grãos favorece a coesão do material.



**Figura 4-13.** Curvas tensão penetração para CBR com diferentes energia de compactação, sem imersão

Geralmente os valores de CBR calculados para uma penetração de 2.54 mm são superiores aos valores para penetração a 5.08 mm. Na Figura 4-13 acontece o contrário. Para esses casos a norma ASTM D1883/07 recomenda fazer a penetração virando os corpos de

prova a fim de verificar esse comportamento. O procedimento foi adotado e novamente o CBR obtido para uma penetração de 5.08 mm ficou acima daquele para 2.08 mm. Feita a verificação adotaram-se os maiores valores de CBR, segundo prescrito pela referida norma.

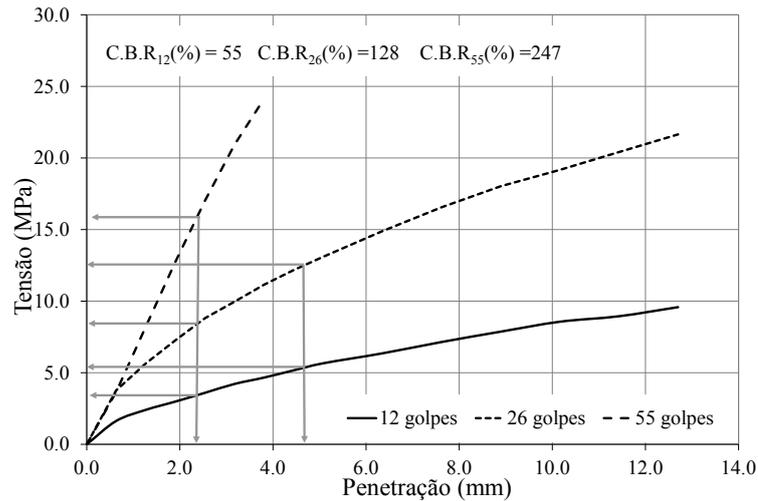
No caso dos ensaios de CBR com medida de expansão os menores resultados foram na utilização da energia normal assim como no ensaio sem expansão. Sendo superior ao valor mínimo requerido na norma NBR 15115/04. Observou-se ainda que para as energias intermediárias e modificada, o CBR do material foi maior que 60%, sendo aceito para o uso em bases de pavimento. A expansão medida nestes ensaios foi nula, os resultados do ensaio se apresentam na Tabela 4–21.

**Tabela 4–21.** Valores de CBR com imersão e medida de expansão

Teste #	Normal (12 golpes)			Intermediária (26 golpes)			Modificada (55 golpes)			Expansão (%)
	CBR (%)	$\omega$ (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	CBR (%)	$\omega$ (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	CBR (%)	$\omega$ (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	
1	55	13	16.3	128	13	16.4	247	13	17.4	0
2	44	13	17.3	91	13	18	197	13	18.3	0
3	43	13	18.1	122	13	19	210	13	18.9	0
Média	47.3	13.0	17.2	113.7	13.0	17.8	218.0	13.0	18.2	
Variância	29.6	0.0	0.8	394.3	0.0	1.7	673.0	0.0	0.6	
Desvio padrão	5.4	0.0	0.9	19.9	0.0	1.3	25.9	0.0	0.8	

As curvas tensão penetração (Figura 4-14) obtidas nos ensaios com imersão tiveram comportamento similar às alcançadas nos ensaios sem imersão. Contudo se esperava que estes resultados fossem menores comparados com os dados alcançados sem imersão, pois normalmente após 96 horas de imersão a resistência do material saturado diminui devido a perda de sucção. Uma possível explicação para este comportamento é que durante o período de saturação, o material fino cimentício não hidratado durante o primeiro uso do material, reage, criando novas cadeias cimentantes que incrementam a resistência mecânica do material.

Na Figura 4-14 observa-se que a curva para 55 golpes (energia modificada) só alcançou a penetração de 3.8 mm,-devido-à capacidade máxima da prensa utilizada no ensaio ser de 5000 kgf. No entanto, os valores de CBR alcançados com a referida energia são superiores a 60% requerido como valor mínimo para o agregado reciclado de RCD. Apesar de serem obvias as diferenças entre os valores CBR obtidos para as energias utilizadas e nos ensaios com e sem imersão. Uma análise estatística foi feita, a ANOVA simples (Tabela 4–22), permitiu concluir que as médias amostrais são significativamente diferentes.



**Figura 4-14.** Curvas tensão penetração para CBR com diferentes energias de compactação, com imersão

**Tabela 4-22.** Resultado da análise de variância (ANOVA) para o CBR com e sem imersão

RESUMO

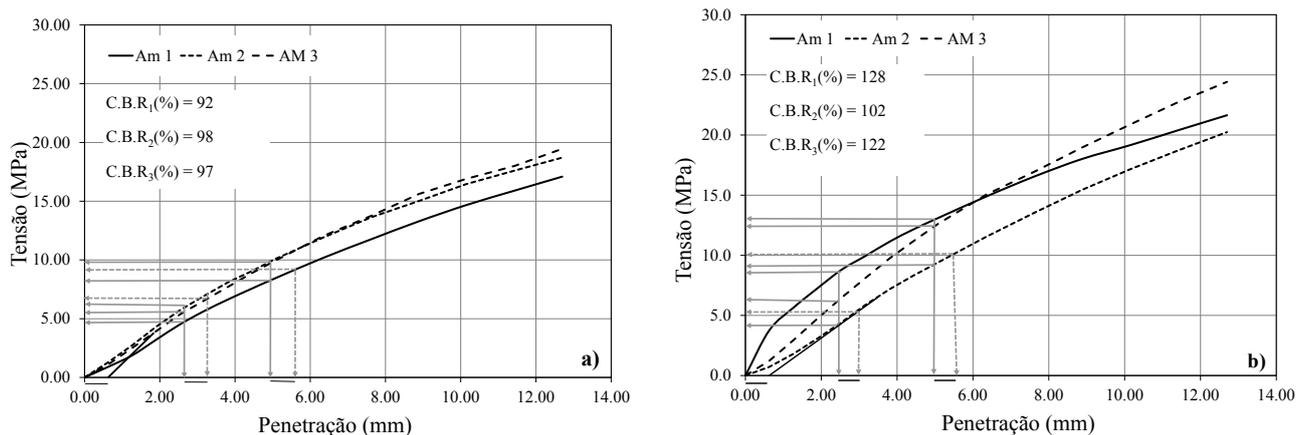
Grupos	Contagem	Soma	Média (%)	Variância	Desvio padrão
Normal 12 Golpes	6	259	43.167	49.767	7.055
Intermediária 26 Golpes	6	627	104.500	262.300	16.196
Modificada 55 Golpes	6	1142	190.333	1342.267	36.637

ANOVA

Fonte da variação	Soma dos quadrados (SQ)	Graus de liberdade (gl)	Média dos quadrados (MQ)	F	Probabilidade	Valor crítico F
Entre grupos	65574.333	2	32787.167	59.457	0.000	3.682
Dentro dos grupos	8271.667	15	551.444			
Total	73846.000	17				

Uma vez que a energia de compactação requerida para compactar a camada de base é a intermediária foram comparados os resultados obtidos para os ensaios com e sem imersão. A Figura 4-15 a e Figura 4-15 b mostram o comportamento da resistência do agregado reciclado de RCD sem e com imersão.

Ao se comparar os valores do CBR sem e com imersão, observa-se para os corpos de prova com imersão os valores médios do CBR são 22% superiores aos sem imersão. Os parâmetros de expansão (nula) e CBR do agregado reciclado do RCD avaliado nesta pesquisa apresentam valores bastante satisfatórios para emprego em camadas de base de pavimentos flexíveis.



**Figura 4-15.** Valores CBR para energia intermediária: a) sem imersão b) com imersão

Como critério de comparação foram usados alguns trabalhos desenvolvidos no Brasil com agregados reciclados. Contudo esses estudos consideram mistura em diferentes proporções de solos lateríticos ou elementos estabilizadores como cal ou cimento para as suas análises.

No caso de Carneiro *et al.* (2001) amostras de agregado reciclado miúdo e graúdo foram misturadas com solo laterítico ou saprolítico como apresentado na Tabela 4-23. Os resultados obtidos mostraram um aumento no CBR quando o agregado reciclado graúdo foi misturado ao solo e ao agregado miúdo A expansão das misturas com agregado graúdo foi praticamente nula. Percebe-se o grande potencial de utilização do agregado reciclado graúdo em pavimentos, visto que as misturas se apresentaram adequadas à utilização em camadas de base e sub-base.

**Tabela 4-23.** Comparação dos resultados das misturas contendo agregado reciclado graúdo (Carneiro *et al.*, 2001)

Amostra	Materiais	$\omega(\%)$	$\gamma_d(\text{kN/m}^3)$	CBR (%)	Expansão (%)
Am 0	100% Solo Laterítico	9.3	18.3	114.6	0.14
Am 10	30% Solo Laterítico/ 70% Ag. Rec. Graúdo	14.2	18.2	112.0	0.00
Am 1	100% Solo Saprolítico	22.0	13.8	25.5	5.69
Am 11	30% Solo Saprolítico/ 70% Ag. Rec. Graúdo	25.8	15.2	50.7	0.65
Am 2	100% Ag. Rec. Miúdo	16.0	16.0	70.0	0.00
Am 12	30% Ag. Rec. Miúdo/ 70% Ag. Rec. Graúdo	16.2	16.9	100.0	0.00

Oliveira *et al.* (2005) realizaram ensaios com as amostras de agregados reciclados puros e com adição de solo. No total, foram realizados quinze ensaios de compactação e CBR, sem reuso de amostras, sendo dois com o solo argiloso e treze com os agregados reciclados puros ou com adição de solo. A energia de compactação utilizada foi a Proctor intermediária. Em todos os ensaios de CBR realizados com os agregados reciclados, a expansão medida foi nula. A Tabela 4–24 apresenta os valores de CBR obtidos nas dosagens de solo argiloso e agregado reciclado cerâmico e de concreto.

**Tabela 4–24.** Valores de CBR obtidos nas dosagens de agregados reciclados (Oliveira, 2005)

<b>Material</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Dosagens (%)</b>	<b>CBR(%)</b>
Agregado reciclado cerâmico	ARCer	100	73
Agregado reciclado de concreto	ARCon	100	105
Agregado reciclado cerâmico e concreto	ARCC	50/50	106
Solo argiloso e agregado reciclado Cerâmico e Concreto	SaCC	20/25/75	92
Solo argiloso e agregado reciclado Cerâmico e Concreto	SaCC	10/25/75	88

Com base na Tabela 4–24 o autor concluiu que os agregados reciclados tem um comportamento satisfatório para emprego em camadas de base de pavimentos com alto volume de tráfego ( $N > 5 \times 10^6$ ) uma vez que os CBR reportados são superiores a 80% e são, portanto, satisfatórios para emprego em camadas de base de pavimentos com médio e baixo volume de tráfego ( $N \leq 5 \times 10^6$ ).

Leite (2006) reportou valores de CBR para quatro amostras de agregados reciclados comparados com uma amostra de brita graduada. O comportamento destes materiais foi satisfatório para as condições de CBR da norma NBR 15115/04. Como observado na Tabela 4–25 apenas a Amostra 1 que foi compactada com energia normal encontrando-se abaixo do CBR de 60% requerido pela referida norma. Todos os outros valores ficaram acima do limite permitindo o uso dos agregados reciclados como material de base.

**Tabela 4–25.** Valores de CBR para agregados reciclados (Leite, 2006)

<b>Material</b>	<b>Energia de compactação</b>	<b>CBR (%)</b>	<b>CBR (%) após 28 dias</b>
Amostra 1 – Agregado reciclado	Normal	45.5	-
Amostra 2 – Agregado reciclado	Intermediária	96.0	-
Amostra 3 – Agregado reciclado	Intermediária	75	-
Amostra 4 – Agregado reciclado	Intermediária	-	94
Amostra 5 – Brita graduada simples	Intermediária	90.0	

Conforme descrito anteriormente os valores de CBR desta pesquisa se enquadraram no intervalo de valores obtidos pelos diversos autores citados, e podem ser considerados

satisfatórios para a construção de camadas de base para pavimentos flexíveis. Apesar da recomendação das normas NBR 15115/04 e 15116/04 ser não usar o agregado reciclado em vias com alto volume de tráfego,  $N > 10^6$ , o material empregado nesta pesquisa poderia ser usado para esta condição uma vez que o parâmetro CBR obtido para energia intermediária supera amplamente o 60% recomendado.

#### **4.17 MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)**

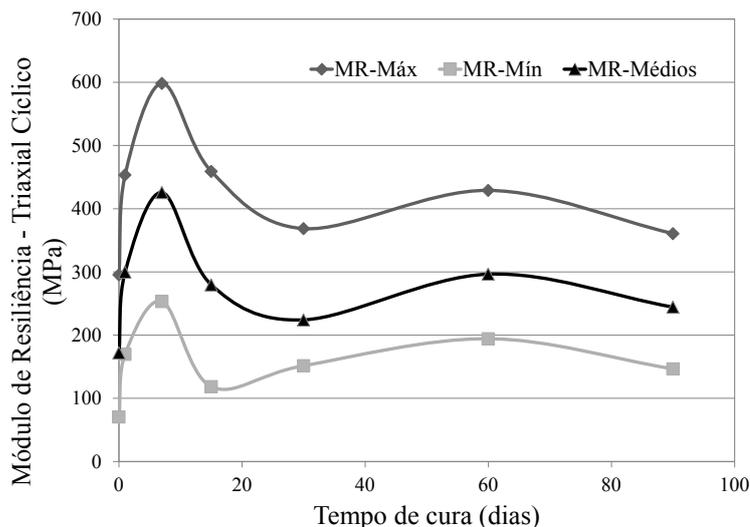
Como foi descrito no capítulo três, foram realizados ensaios triaxiais cíclicos sobre corpos de prova de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura para diferentes períodos de cura (imediate, 1, 7, 15, 30, 60 e 90 dias). O ensaio consta de duas etapas: na primeira são aplicados os carregamentos cíclicos com os quais é possível calcular os módulos de resiliência e obter a deformação permanente; a segunda etapa consiste em um cisalhamento rápido onde carregamentos axiais são aplicados sobre o corpo de prova submetido a uma tensão de confinamento de aproximadamente 34.5 kPa como descrito na norma AASHTO T 307-99. Os resultados obtidos nas duas etapas são apresentados e discutidos a seguir.

##### **4.17.1 Ensaio Triaxial Cíclico e Obtenção de Módulos de Resiliência**

Os valores de módulo de resiliência experimentais foram calculados fazendo uma média dos últimos cinco ciclos de cada sequência de carregamento e foram fornecidos pelo programa de aquisição de dados da prensa triaxial cíclica utilizada. A Figura 4-16 apresenta os valores de MR mínimos, máximos e médios obtidos durante o ensaio triaxial cíclico, para corpos de prova submetidos a diferentes períodos de cura.

Os valores mínimos encontram-se num intervalo entre 70 e 250 MPa, e os valores máximos variam de 300 a 600 MPa, dentro desses intervalos, os valores inferiores foram obtidos para os períodos de cura imediata ou nas primeiras 24 horas (1 dia). Os valores médios apresentados na Figura 4-16 estão entre 180 e 420 MPa.

A Figura 4-16, mostra que entre zero e sete dias o módulo de resiliência aumenta consideravelmente passando de um valor médio de 172 MPa na condição imediata para 300 MPa com um dia de cura e para 426 MPa em 7 dias. Houve uma queda inesperada no valor de MR para 15 dias. Após este período de cura o módulo apresenta valores mais ou menos próximos indicado um processo de estabilização.



**Figura 4-16.** Variabilidade dos valores de módulo de resiliência ao longo do tempo

Era esperado que o módulo de resiliência fosse crescente durante os primeiros 30 dias e que começasse a se estabilizar após esse período. Com o intuito de dar uma explicação ao comportamento apresentado na Figura 4-16, foi feita uma comparação entre os teores de umidade das amostras utilizadas no ensaio antes e após os tempos de cura. A Tabela 4–26, apresenta os teores de umidade, os pesos específicos secos e os módulos de resiliência do agregado reciclado de RCD para os diferentes períodos de cura analisados.

**Tabela 4–26.** Verificação do teor de umidade antes compactação e após tempo de cura

Tempo (dias)	$\omega\%$ compactação	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega\%$ após ensaio	MR médio (MPa)
0	12	17.3	13▲	172
1	13	17.6	13 =	300
7	13	17.7	13 =	426
15	13	17.4	13 =	280
30	14	17.2	13▲	224
60	11	17.1	10▲	296
90	12	17.9	13▲	244

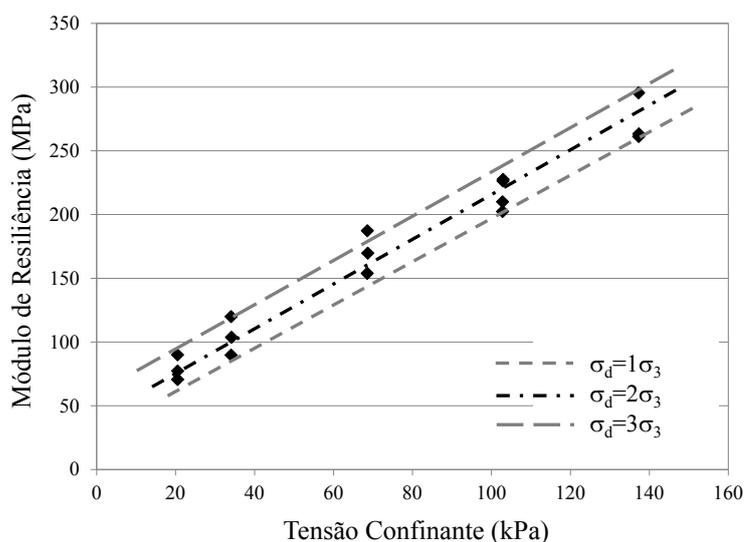
Os teores de umidade antes e após os diferentes períodos de cura são semelhantes, como mostram os valores de média e o desvio padrão apresentados na Tabela 4–27. Isso indica que o aumento no módulo de resiliência nos primeiros sete dias não se deve à perda de umidade durante a cura e que a queda do mesmo parâmetro com 15 dias de cura também não é devido à sucção. Contudo o comportamento anteriormente descrito poderia estar atrelado a passagem da água dos macroporos para os microporos até o pico (7 dias) e a queda no período de cura de 15 dias poderia estar se dando por perda de resistência dos agregados. Entretanto para os demais períodos de cura ( $\geq 30$  dias) houve uma elevação não desejada no nível de

água no tanque de cura, implicando na inundação do terço inferior dos corpos de prova. Isso pode explicar a queda de MR para os períodos de 30, 60 e 90 dias associada à perda de capilaridade.

**Tabela 4–27.** Valores médios dos teores de umidade dos corpos de prova para MR

Grupos	Umidade Média (%)	Variância	Desvio padrão
$\omega\%$ compactação	13	1.083	1.041
$\omega\%$ após ensaio	13	1.349	1.162

Os módulos de resiliência variaram segundo as tensões de confinamento e desvio que foram aplicadas. A Figura 4-17, apresenta a mudança do MR imediatamente após compactação (0 dias de cura), observa-se que o módulo de resiliência cresce quando cresce a tensão confinante e é crescente também com o incremento da tensão desvio. A mesma tendência foi comprovada para os períodos de cura correspondentes a 1, 7, 15, 30, 60 e 90 dias de cura.



**Figura 4-17.** Variação do módulo de resiliência com a tensão confinante, após compactação

Espera-se que em materiais granulares, o módulo de resiliência decresça com o incremento da tensão desvio. Não obstante, as diferentes pesquisas desenvolvidas com agregados reciclados (Arm, 2001; Motta & Fernandes, 2003; Fernandes, 2004; Motta, 2005) apresentam módulos de resiliência crescentes com o aumento da tensão desvio. Isso poderia estar relacionado com o aumento de rigidez provocada pela quebra das partículas gerada durante a compactação.

Dois modelos constitutivos foram usados na predição dos valores de módulo de resiliência para o agregado reciclado de RCD estudado nesta pesquisa. O primeiro é o modelo conhecido como Universal apresentado no capítulo três. Este modelo depende do primeiro

invariante de tensões ( $\theta$ ) e da tensão cisalhante octaédrica ( $\tau_{oct}$ ), o módulo é calculado como apresentado na Equação (3.15).

O segundo modelo é conhecido como modelo misto e depende da tensão de confinamento ( $\sigma_3$ ) e da tensão desvio ( $\sigma_d$ ).

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (4.1)$$

Com:

MR = módulo de resiliência;

$\sigma_3$  = tensão confinante;

$\sigma_d$  = tensão desvio ( $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ );

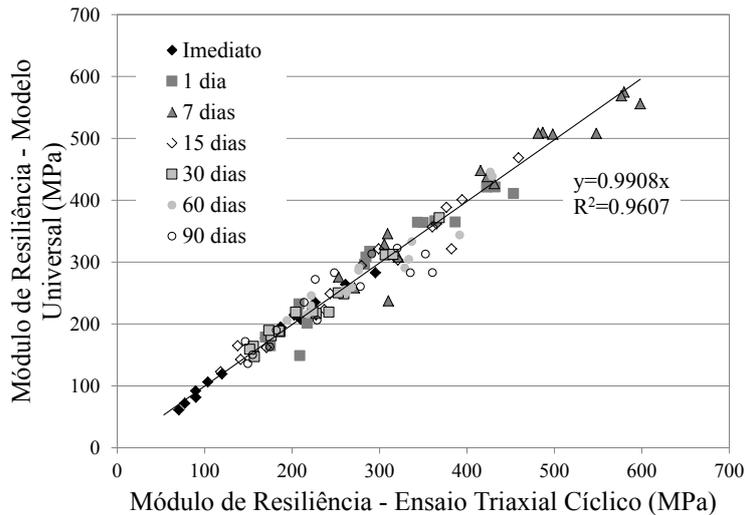
$k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  = coeficientes de regressão.

Os dados experimentais apresentados na Figura 4-16 foram utilizados para a calibração das constantes dos modelos. Os coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  correspondem a propriedades do material relativas à rigidez inicial ( $k_1$ ), e às não linearidades por influência da tensão de confinamento ( $k_2$ ) e do desvio ( $k_3$ ) respectivamente. Esses coeficientes foram calculados com o auxílio de um macro utilizando o programa Excel®. Os valores dos coeficientes e de MR obtidos para ambos os modelos são apresentados na Tabela 4–28.

**Tabela 4–28.** Coeficientes de regressão

t (dias)	Modelo Universal				Modelo Misto			
	MR (MPa)	k1	k2	k3	MR (MPa)	k1	k2	k3
0	171	745.37	0.84	-0.35	172	1096.77	0.59	0.13
1	299	1763.68	0.64	-0.49	299	1097.58	0.49	0.00
7	425	2753.68	0.55	-0.45	425	1283.23	0.42	-0.02
15	280	1318.25	0.52	0.37	280	1383.97	0.32	0.32
30	224	1302.12	0.01	1.25	224	598.93	-0.02	0.45
60	293	1746.78	-0.07	1.52	296	694.62	-0.10	0.47
90	239	1479.76	0.45	0.00	244	999.99	1.00	0.00

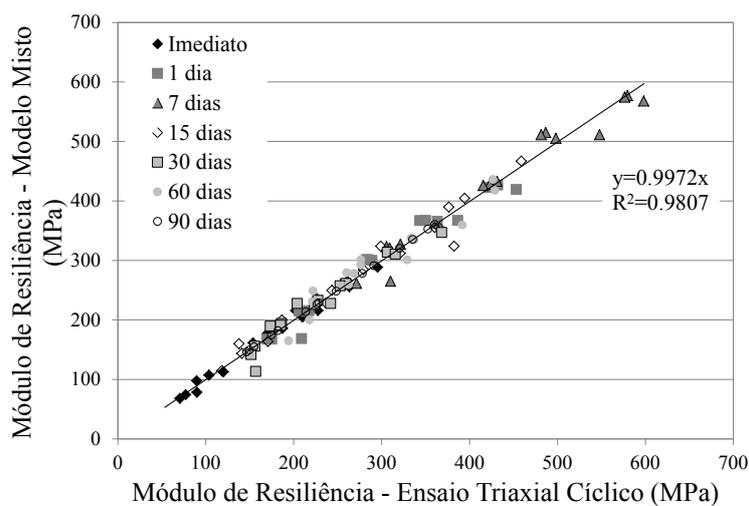
A Figura 4-18 apresenta a relação entre os módulos de resiliência obtidos com os ensaios triaxiais cíclicos com os módulos de resiliência calculados utilizando o modelo Universal. Os valores de módulo calculados apresentam uma leve dispersão na parte central da Figura 4-18, contudo, a correlação entre o modelo constitutivo (Universal) e os dados experimentais pode ser considerada muito boa com um coeficiente de correlação igual a 0.9607.



**Figura 4-18.** Variação do MR do Triaxial Cíclico vs. Modelo Universal

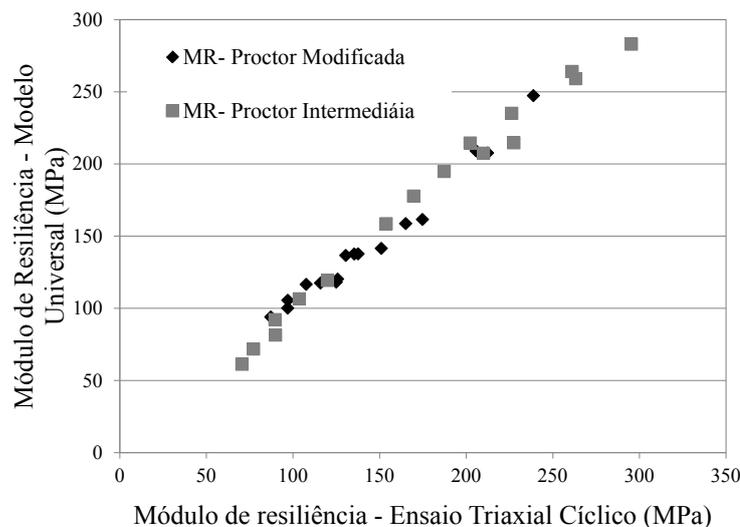
A relação entre os valores dos módulos de resiliência experimentais com os obtidos pelo modelo Misto é apresentada na Figura 4-19. Nessa figura se observa que a dispersão ao redor da curva de regressão proposta é muito pequena, o que fornece um coeficiente de correlação igual a 0.9807, indicando que o modelo pode ser utilizado de forma confiável na predição do módulo de resiliência com o agregado reciclado utilizado nesta pesquisa.

Com o intuito de verificar o quanto a mudança de energia de compactação, afeta o módulo de resiliência foi feito um ensaio triaxial cíclico para cada energia sem considerar períodos de cura. O ensaio na energia normal não foi realizado pois o corpo de prova rompeu-se durante a montagem do ensaio.



**Figura 4-19.** Variação do MR do Triaxial Cíclico vs. Modelo Misto ao longo do tempo

A Figura 4-20 apresenta os resultados obtidos para o MR com energia intermediária e o MR com energia modificada. Os valores de módulo obtidos para o agregado reciclado de RCD avaliado nesta pesquisa variam de 90 a 310 MPa quando foi usada a energia intermediária e entre 90 e 240 quando usada a energia modificada. Os valores obtidos com esta última são um pouco menores que os obtidos com a energia intermediária como se observa na Figura 4-20. Acredita-se que esta queda de módulo de resiliência esteja relacionada ao maior deslocamento de curva granulométrica ocasionada pela maior quebra de grãos na energia Proctor modificada.



**Figura 4-20.** Resultados de módulo de resiliência do agregado reciclado de RCD com diferentes energias de compactação

Os valores de módulo de resiliência mínimos, máximos e médios obtidos durante os ensaios triaxiais cíclicos utilizando as energias de compactação Proctor intermediária e modificada são apresentadas na Tabela 4-29.

**Tabela 4-29.** Módulos de resiliência para diferentes energias de compactação

Valor	Módulos de Resiliência (MPa)	
	Proctor Modificada	Proctor Intermediária
Mínimo	90	90
Máximo	240	310
Médio	140	190

Pesquisadores como Zeghal (2009) e Leite *et al.* (2011) avaliaram o módulo de resiliência utilizando diferentes energias de compactação. Zeghal (2009) utilizou corpos de prova de material virgem e recompactados com graus de compactação de 95 e 90% do peso seco específico máximo obtido para a energia Proctor modificado, e mantendo a mesma umidade (ótima). A tensão desvio aplicada durante o ensaio foi de 50 KPa. Os resultados

desta pesquisa indicam que ao aumentar a densidade de 90% para 95% o MR também apresenta um aumento. Entretanto, ao comparar os valores de módulo de resiliência do material antes e após o processo de compactação, para o mesmo grau de compactação, percebe-se uma diminuição no MR de 50%. Esta diminuição é atribuída à quebra das partículas durante a compactação. A Tabela 4–30 apresenta as variações do módulo de resiliência em um material antes e após ser submetido à compactação.

**Tabela 4–30.** Mudança do módulo de resiliência devido a quebra das partículas. Tensão desvio 50 kPa (Zeghal, 2009)

Tipo de Agregado	Módulos de Resiliência (MPa)	
	95% do Modificado	90% do Modificado
Original (antes compactação)	320	204
Afetado (após compactação)	163	108

Leite *et al.* (2011), avaliando agregados reciclados de RCD da cidade de São Paulo, encontraram que o incremento da energia de compactação gera um aumento no módulo de resiliência: para a energia intermediária o módulo variou entre 160 e 440 MPa, e para a energia modificada o MR variou entre 200 e 500 MPa, dependendo da tensão volumétrica.

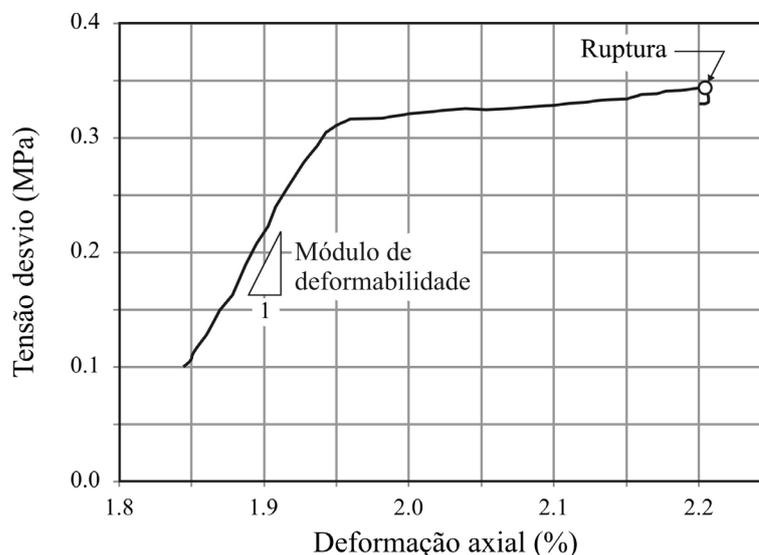
Os valores de módulo de resiliência de RCD publicados na literatura geralmente variam numa faixa entre 150 MPa e 500 MPa, para corpos de prova compactados com a energia Proctor modificado. Zeghal (2009) encontrou valores entre 320 e 402 MPa para 95% de grau de compactação. Nataatmadja & Tan, (2001) apresentam valores entre 160 e 550 MPa. Os valores reportados por Leite *et al.* (2011) variaram entre 200 e 500 MPa. Os diversos valores de MR podem ser atribuídos à diversidade de composição dos materiais ensaiados pelos diferentes autores bem como aos distintos níveis de tensão aplicados durante os ensaios. Os valores de MR encontrados para o RCD utilizado nesta pesquisa são compatíveis com os valores encontrados na literatura.

#### 4.17.2 Ensaio de Cisalhamento Rápido

Após completar as 15 sequências de tensões confinantes e desvio para cálculo do módulo de resiliência prescritas na norma AASHTO T 307-99, foi feito um ensaio de cisalhamento rápido. A pressão na câmara foi reduzida até atingir 34.5 kPa aproximadamente, e aplicou-se o carregamento controlando a deformação com uma velocidade de 1% por minuto.

O ensaio permitiu obter dados de resistência e deformabilidade, para cada período de cura avaliado. Não foi possível obter dados dos corpos de prova com 60 dias de cura uma vez que todos eles romperam antes de começar o cisalhamento rápido. A Figura 4-21 apresenta o

comportamento típico da curva tensão-deformação do agregado reciclado de RCD avaliado durante o ensaio de cisalhamento rápido. Com a informação da relação tensão-deformação foi identificada a tensão desvio em que o corpo de prova apresenta ruptura. A 30 dias de cura (Figura 4-21) a ruptura ocorreu para uma tensão desvio de 0.32 MPa.



**Figura 4-21.** Curva tensão-deformação, obtida após ensaio triaxial cíclico, 30 dias de cura. Tensão confinante  $\sigma_3=34.5$  kPa

Nota-se que a deformação axial obtida durante o ensaio, não começa em zero uma vez que durante o ensaio triaxial cíclico o corpo de prova vai se deformando até chegar a uma deformação permanente que é a que aparece como ponto inicial na curva tensão deformação.

O trecho inicial das curvas tensão-deformação é uma reta bem definida, o que permitiu calcular um módulo de deformabilidade (D) tangente inicial para cada ensaio. Os valores médios de D e a tensão desvio máxima suportada pelo material (resistência) são apresentados na Tabela 4-31.

**Tabela 4-31.** Resultados obtidos do ensaio triaxial rápido

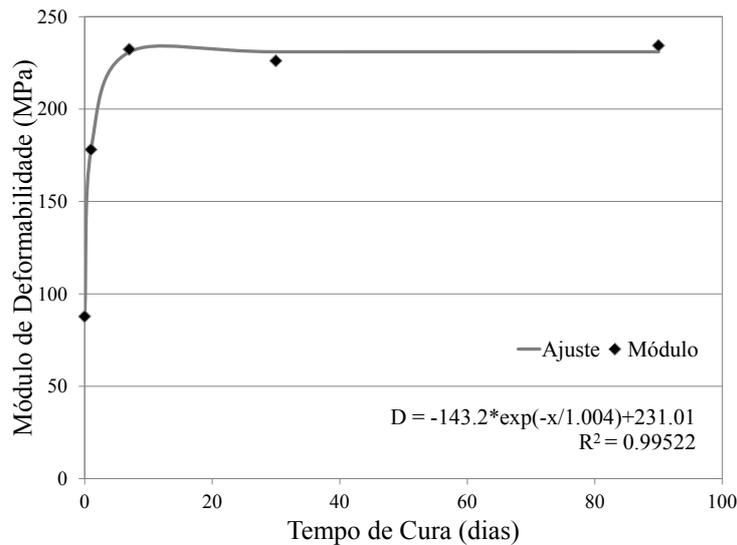
Tempo de cura (dias)	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1$ (kPa)	Resistência (kPa)	D (MPa)	MR (MPa)
0	34	279	245	88	176
1	35	318	283	178	301
7	35	333	298	232	425
15	38	296	258	222	284
30	37	339	303	226	232
90	38	323	285	234	244

Com os dados calculados, um gráfico da variação do módulo de deformabilidade com o tempo foi elaborado (Figura 4-22). Nessa figura é possível observar que o módulo de deformabilidade cresce nos primeiros 7 dias de cura e depois desse período, começa a se

estabilizar. Esse comportamento indica que o agregado reciclado de RCD ganha rigidez ao longo do tempo, o que é benéfico para um material de base. Os dados experimentais foram ajustados com uma regressão do tipo exponencial decrescente grau um tendo sido obtida a seguinte expressão:

$$D = -143.2 * \exp\left(-\frac{x}{1.004}\right) + 231.01 \quad (4.2)$$

O coeficiente de regressão obtido para o ajuste foi de  $R^2 = 0.9952$ .



**Figura 4-22.** Variação do Módulo de Deformabilidade com o tempo de cura

Da informação adquirida no ensaio foram plotadas as trajetórias de tensões totais (Figura 4-23), usando o diagrama s-t do Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), segundo as seguintes equações:

$$s = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (4.3)$$

$$t = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (4.4)$$

Com:

$\sigma_1$  = tensão principal maior em kPa

$\sigma_3$  = tensão principal menor em kPa

Usando os valores de s e t correspondentes à tensão desvio máxima da curva tensão-deformação e a origem ( $s=0$ ), ( $t=0$ ) foi definida a linha Kf. A linha Kf é uma representação no espaço s-t da envoltória de resistência no espaço  $\sigma$ - $\tau$ . O ângulo de atrito do material é obtido a partir da reta Kf por meio das seguintes relações:

$$\sin \phi = \tan \alpha \quad (4.5)$$

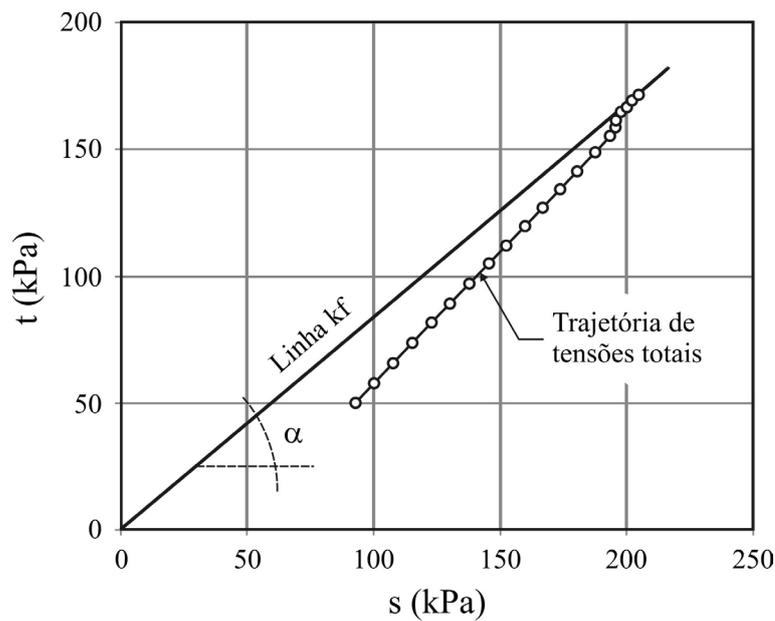
$$c = \frac{a^*}{\cos \phi} \quad (4.6)$$

Sendo:

$\phi$  = ângulo de atrito

$c$  = coesão  $a^*$  = Intercepto da linha Kf com relação ao eixo t

$\alpha$  = ângulo de inclinação da linha Kf



**Figura 4-23.** Trajetória de tensões calculada em termos de t e s, 30 dias de cura

Os ângulos de atrito foram calculados para  $a^* = 0$ . Os valores de ângulo de atrito do agregado reciclado de RCD variaram de  $51^\circ$  a  $55^\circ$ , não sendo representativa a variação com o tempo. Os ângulos de atrito são apresentados na Tabela 4-32 e correspondem a valores típicos encontrados para materiais grossos granulares tipo brita.

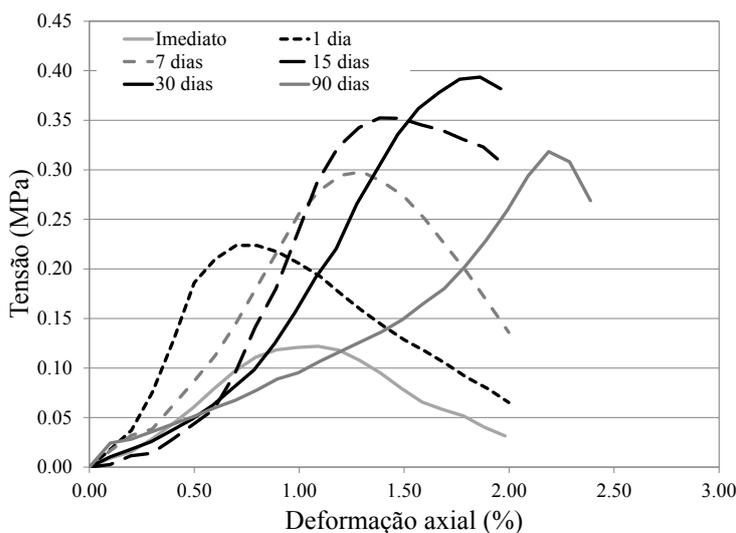
**Tabela 4-32.** Ângulos de atrito calculados para o agregado reciclado de RCD avaliado

Tempo de cura (dias)	s (kPa)	t (kPa)	$\tan \alpha$	$\phi$ ( $^\circ$ )
0	156	123	0.784	52
1	176	141	0.800	53
7	184	149	0.814	54
15	167	129	0.773	51
30	188	151	0.804	54
90	180	143	0.791	52

#### 4.18 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA.

Como descrito no item 3.5.5, neste ensaio foram utilizados os mesmos corpos de prova empregados no ensaio de módulo de resiliência e, portanto nos mesmos períodos de cura desse ensaio. A Figura 4-24 apresenta as curvas tensão-deformação, obtidas durante o ensaio de compressão não confinada. Todas elas apresentam um comportamento côncavo para cima no início da curva. Esse comportamento é considerado normal uma vez que no início dos carregamentos os vazios e as pequenas fissuras geradas no ensaio de módulo de resiliência são fechados até o nível que o corpo de prova testado consegue receber carregamentos incrementais até a sua ruptura.

Diferentes níveis de tensão e deformação foram alcançados. Os valores de tensão foram crescentes segundo o período de cura. Contudo o corpo de prova com um dia de cura chegou à ruptura em uma tensão de 0.22 MPa com apenas uma deformação unitária de 0.8%, menor que as deformações alcançadas pelos outros corpos de prova, o corpo de prova com um período de cura de 90 dias, rompeu em 0.33 MPa e apresentou a maior deformação axial.



**Figura 4-24.** Variação da resistência à compressão não confinada ao longo do tempo

Durante a desmontagem do ensaio de módulo de resiliência, os corpos de prova com 60 dias de cura foram rompidos e não foi possível fazer o ensaio de compressão não confinada em nenhum deles. Todos os corpos de prova ensaiados apresentaram o mesmo padrão de ruptura, fissuras e trincas longitudinais, no sentido de aplicação do carregamento. Uma vez que as trincas não aparecem sobre o eixo dos corpos de prova, pode-se pensar em ruptura por cisalhamento provocada pelo atrito entre a placa e o corpo de prova.

A Figura 4-25 apresenta o processo de aparição de trincas em diferentes corpos de prova ensaiados conforme a norma ASTM D2166-06.



**Figura 4-25.** Processo de aparição de trincas longitudinais durante ensaio de compressão simples

#### 4.19 DETERMINAÇÃO DE ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CIMENTO PORTLAND

Como descrito no item 3.5.6, ensaios para determinar a atividade pozolânica do agregado reciclado miúdo do RCD foram feitos no laboratório de FURNAS. Os resultados são apresentados na Tabela 4-33.

**Tabela 4-33.** Índice de atividade pozolânica

Moldagem NBR 7215	Areia NBR7214 (g)	Cimento (g)	Material em análise (g)	Água (g)	Consistência (mm)	Carga de ruptura 28 dias (kgf)	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	IAP NBR 5752
Controle	936.0	312.0	0.0	165.0	226.0	6.386	31.9	30.2	52%
						5.716	28.6		
						6.021	30.1		
Amostra	936.0	202.8	109.2	177.0	225.0	3.126	15.6	15.7	
						3.237	16.2		
						3.075	15.4		

Como foi apresentado no item 3.5.6 a norma NBR 12653/92 estabelece exigências químicas e físicas para aceitar um material como pozolânico. Foi feita uma comparação entre os valores especificados pela norma e o material avaliado. Os valores obtidos para a amostra sob análise são apresentados na Tabela 4-34. Observa-se que o RCD avaliado não atende às exigências da norma e não pode ser considerado material pozolânico puro. Contudo, a resistência à compressão simples alcançou um valor razoável (15.7 MPa).

**Tabela 4–34.** Comparação entre o RCD avaliado e os valores da norma NBR 12653/92

Propriedades	Classes de material pozolânico			RCD avaliado
	N	C	E	
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %mín.	70	70	50	50.66
SO <sub>3</sub> , %máx.	4.0	5.0	5.0	-
Teor de umidade, %máx	3.0	3.0	3.0	3.0
Perda ao fogo, %máx	10.0	6.0	6.0	26.76
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O, %máx	1.5	1.5	1.5	-
Material retido na peneira 45µm (325 mm), %máx	34	34	34	-
Índice de atividade pozolânicas:				
- com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, %mín	75	75	75	52
- com o cal aos 7 dias, em MPa	6.0	6.0	6.0	-
- água requerida, %máx	115	110	110	-
Os dados que estão em falta não foram subministrados pelo laboratório				

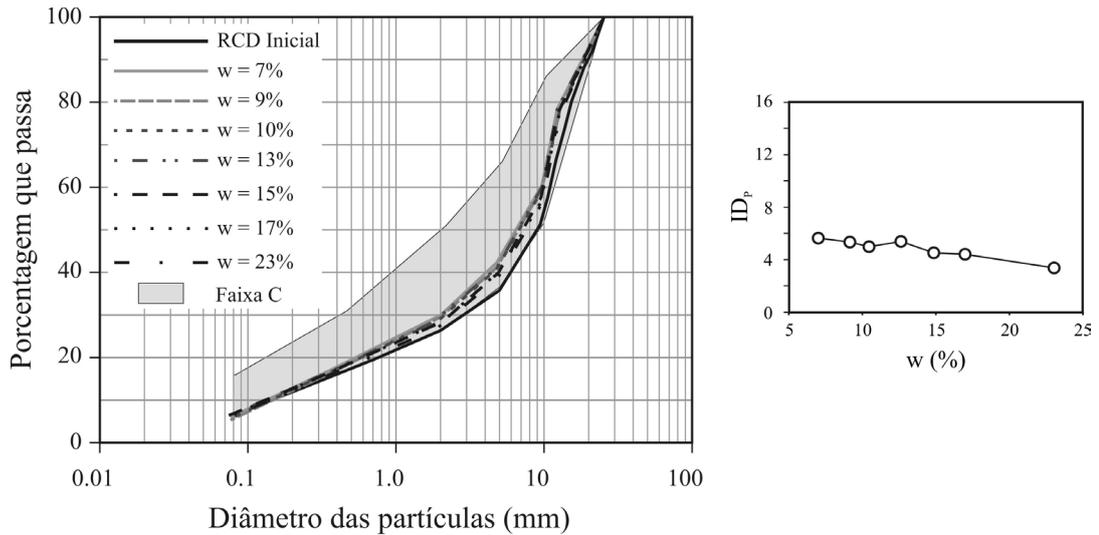
#### 4.20 AVALIAÇÃO DA QUEBRA DOS GRÃOS

Como apresentado no item 3.6, dois métodos foram empregados no cálculo dos índices de quebra, tendo suas curvas granulométricas sido conhecidas antes e após cada ensaio. A avaliação da quebra dos grãos para o RCD foi realizada nos ensaios de compactação, CBR e módulo de resiliência. Os resultados e as análises são apresentados a seguir.

##### 4.20.1 Quebra de grãos variando a energia de compactação

Inicialmente foi avaliado o efeito da energia de compactação e do teor de umidade na quebra do agregado de RCD. A Figura 4-26, apresenta as curvas granulométricas obtidas após compactação Proctor Normal em cada teor de umidade utilizado. Nessa figura observa-se claramente que a maior mudança na curva granulométrica do material deu-se quando o agregado reciclado estava mais seco (umidade de 7%) e a menor variação com relação à granulometria original, deu-se com o maior teor de umidade (23%).

Para verificar o observado na Figura 4-26, foram calculados os índices de quebra após compactação Proctor (ID<sub>p</sub>) para cada teor de umidade. O resultado mostrou que existe a mudança na distribuição granulométrica é dependente do teor de água utilizado. Observa-se que para um teor de umidade de 7%, o índice de quebra correspondente é de aproximadamente 6%. Para o máximo teor de água utilizado (23%), o índice de quebra decresceu para 3.0%. A Tabela 4–35 apresenta os índices de quebra ID<sub>p</sub> obtidos após o ensaio de compactação Proctor Normal.

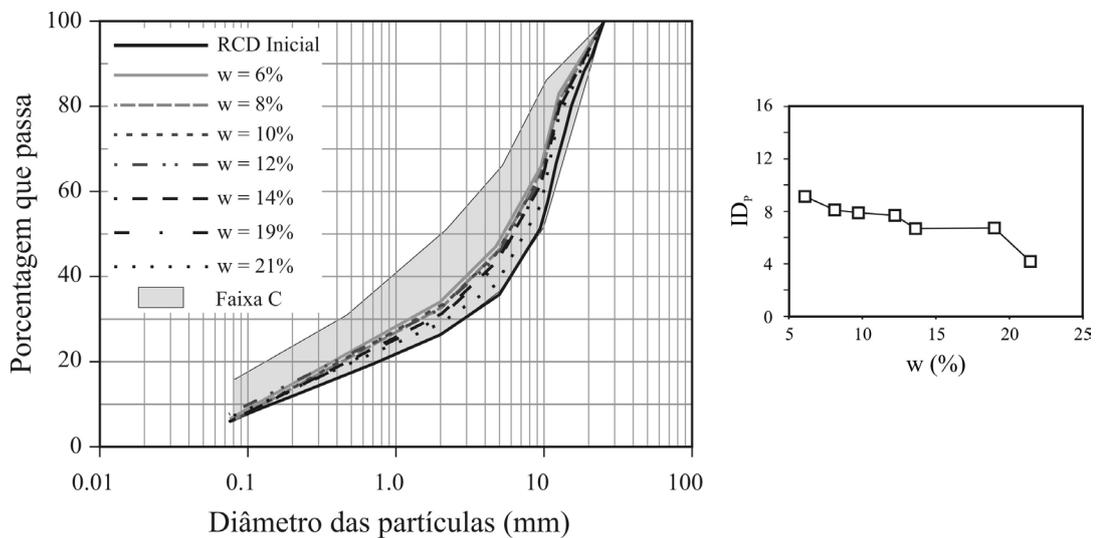


**Figura 4-26.** Variação da curva granulométrica com o teor de umidade, usando Proctor Normal

**Tabela 4-35.** Índices de quebra com variação do teor de umidade, energia Proctor Normal

Umidade (%)	7	9	10	13	15	17	23
<b>ID<sub>p</sub> (%)</b>	5.6	5.3	5.0	5.3	4.4	4.4	3.4

A influência das energias intermediária e modificada, também foi analisada. A Figura 4-27, apresenta o comportamento da curva granulométrica na energia Proctor Intermediária ao serem variados os teores de umidade da curva de compactação. Nessa figura, observa-se que para a umidade de compactação de 6% a mudança na forma da curva granulométrica é maior que quando utilizado um teor de umidade alto (21%).



**Figura 4-27.** Variação da curva granulométrica com o teor de umidade, usando Proctor Intermediário

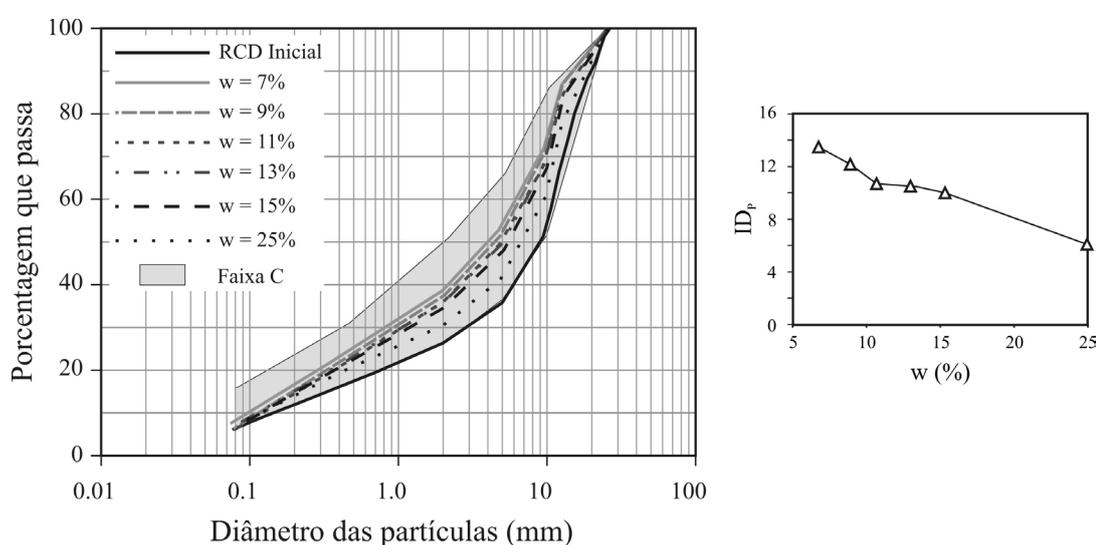
Os índice de quebra após compactação Proctor ( $ID_p$ ) foram calculados para cada uma das curvas granulométricas, tendo em conta o teor de água da compactação. Os valores

obtidos mostram que o índice de quebra decresce com o aumento do teor de umidade. A Tabela 4–36 apresenta os resultados obtidos para os índices de quebra referenciados.

**Tabela 4–36.** Índices de quebra com variação do teor de umidade, energia Proctor Intermediária

Umidade (%)	6	8	10	12	14	19	21
ID <sub>p</sub> (%)	9.2	8.1	7.9	7.8	6.7	6.8	4.2

O mesmo comportamento observado nas curvas granulométricas obtidas para as energias normal e intermediária foi verificado para a energia modificada. A Figura 4-28, apresenta a variação das curvas granulométricas segundo os diferentes teores de umidade utilizados no ensaio de compactação. Nessa figura é possível observar que a maior mudança na curva granulométrica ocorre quando o teor de água utilizado na compactação é de 7% e a menor mudança com relação à curva original dar-se com um teor de umidade de 25%.



**Figura 4-28.** Variação da curva granulométrica com o teor de umidade usando Proctor Modificado

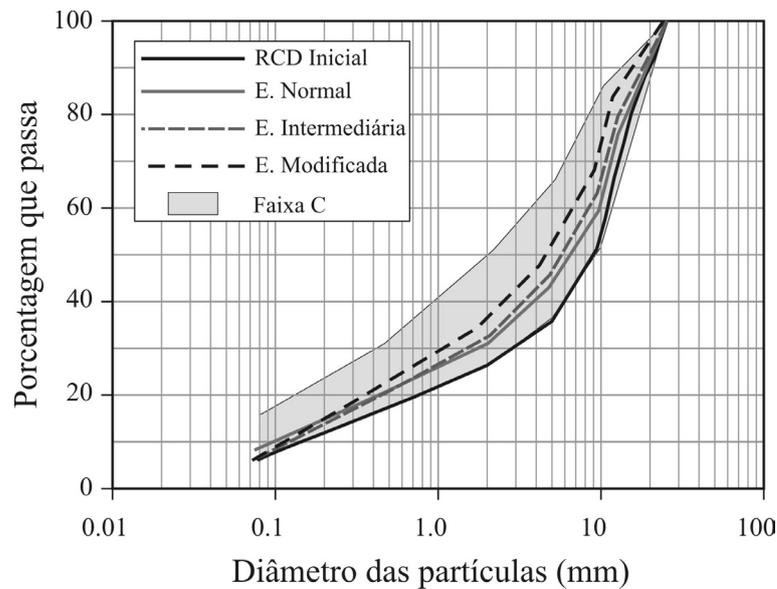
A Tabela 4–37 mostra os valores de índices de quebra calculados para as curvas granulométricas obtidas após compactação Proctor modificada. Os valores corroboram com o observado nas curvas granulométricas, sendo que a menor quebra de grãos ocorre a um teor de umidade de 25% e a maior com 7% de umidade.

**Tabela 4–37.** Índices de quebra com variação do teor de umidade, energia Proctor Modificada

Umidade (%)	7	9	11	13	15	25
ID <sub>p</sub> (%)	13.5	12.2	10.8	10.5	10.1	6.1

Foi verificada uma tendência de que os maiores valores nos índices de quebra do material analisado estejam associados à menores teores de umidade isso ocorre devido a que a maior teor de umidade a energia da compactação é transferida para à água e não para o esqueleto sólido.

A mudança de tamanho dos grãos à medida que a energia do ensaio aumentava foi evidente. Nesse caso, a menor mudança na forma da curva granulométrica ocorreu quando foi utilizada a energia normal e a maior quebra ocorreu com a energia modificada. A Figura 4-29 apresenta três curvas granulométricas compactadas com diferentes energias e uma umidade fixa de 13%. Observa-se também que as curvas granulométricas foram deslocadas para a esquerda da curva original, mas, sem ultrapassar o limite máximo da faixa C do DNIT.



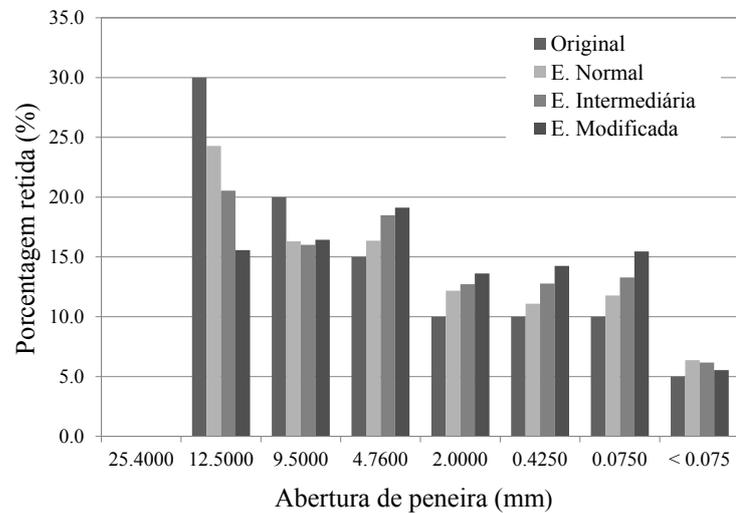
**Figura 4-29.** Efeito da energia de compactação na curva granulométrica

Para tentar quantificar a mudança nos tamanhos dos grãos após compactação um gráfico de barras (Figura 4-30) foi elaborado. A referida figura apresenta a porcentagem de material retido em cada peneira antes (material original) e após cada compactação.

Pode-se observar que a maior quebra correspondeu à fração de 12.5 mm, onde é evidente a influência da energia uma vez que a quantidade de material inicialmente retida correspondia a 30%. Quando empregada à energia normal, a porcentagem retida reduziu de 30% para 24%. No caso da energia intermediária a porcentagem retida chegou a 20.5%. Finalmente com o uso da energia modificada a porcentagem retida foi de 15.5%. Os resultados deixam claro que o aumento da energia de compactação afeta o tamanho das partículas.

Ainda fazendo referência à Figura 4-30 e olhando para a fração de 9.5 mm, pode-se dizer que apesar de existir uma quebra de material para as diferentes energias, essa é constante, com a porcentagem retida reduzindo dos 20% originais para cerca de 16%. A partir da fração 4.75 mm o comportamento das barras se inverteu, pois com aplicação da energia

modificada a porcentagem de finos tende a aumentar em relação ao material original. Este fato pode ser explicado pela quebra dos grãos nas frações anteriores, que geram frações menores.



**Figura 4-30.** Quantificação da quebra dos grãos

No caso da fração de 4.75 mm, a porcentagem retida passa de 15% a 19% para a energia modificada. Na energia intermediária esse aumento é de 15% para 18.5%, e na energia normal de 15% para 16.4%. Entre 2.0 mm e 0.075 mm o comportamento é similar ao aumento máximo dado quando empregada a energia modificada. É possível concluir que a maior quebra dos grãos corresponde às frações maiores a 4.75 mm e que o incremento na quantidade de finos, é produzida pela quebra de grãos e o atrito entre as partículas durante o processo de compactação.

Foram também calculados os índices de quebra devido à compactação Proctor ( $ID_p$ ) e o índice  $B_g$  segundo a metodologia proposta por Marsal (1975). Esses índices indicaram como apresentado anteriormente que a energia modificada é a que mais afeta o tamanho das partículas, gerando a maior quebra de grãos. A Tabela 4-38 apresenta os resultados obtidos para cada índice. É possível observar que existe uma diferença nos valores entre o método do DNER ( $ID_p$ ) e o método de Marsal ( $B_g$ ), devido às diferentes definições empregadas.

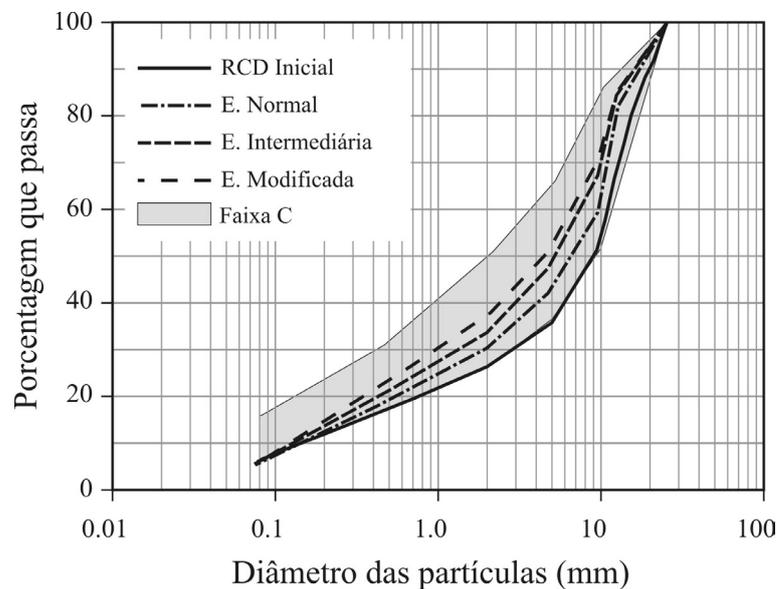
**Tabela 4-38.** Índices de quebra obtidos para diferentes energias de compactação

Energia Proctor Utilizada	DNER ( $ID_p$ ) %	Marsal ( $B_g$ ) %
Normal	6	9
Intermediária	8	13
Modificada	11	18

#### 4.20.2 Quebra de grãos após ensaio CBR

Após o ensaio CBR sem e com imersão, os corpos de prova desmoldados, pesados e levados para uma estufa onde foram secos à temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ , até peso constante, para determinar o teor de umidade após o ensaio. Uma vez determinado este parâmetro, o resíduo foi submetido a ensaio de granulometria por peneiramento. A variação das curvas granulométricas segundo a energia de compactação é mostrada na Figura 4-31.

Na Figura 4-31, pode-se observar que a energia modificada altera em maior proporção a granulometria do resíduo avaliado e a menor alteração se apresenta quando a energia de compactação normal é utilizada. A mesma observação já tinha sido comentada na avaliação da quebra de grãos utilizando diferentes energias de compactação.



**Figura 4-31.** Curvas granulométricas obtidas após ensaio CBR com imersão

Uma vez que o ensaio de CBR foi realizado seguindo a norma ASTM D1883-07, como descrito no item 3.5.3, foram obtidos valores de índices de quebra para cada energia de compactação Proctor. A Tabela 4-39 apresenta os resultados dos índices de quebra  $ID_p$  obtidos após ensaios CBR para diferentes energias de compactação. É possível observar que os valores dos índices de quebra são similares quando usada à mesma energia e que os índices não são afetados pelo processo de imersão. O mesmo comportamento se apresenta quando calculados os índice de quebra de Marsal ( $B_g$ ) ver Tabela 4-40. Nessa tabela, se observa que os valores de índice de quebra calculados com a metodologia Marsal são maiores que os calculados pela metodologia do DNER. A diferença decorre das definições adotadas, sendo

que o índice  $B_g$  de Marsal utiliza apenas os valores positivos, resultando, por tanto, em um índice mais elevado.

**Tabela 4–39.** Índices de quebra ( $ID_p$ ) obtidos para o ensaio CBR nas diferentes energias de compactação

Teste N	E. Normal		E. Intermediária		E. Modificada	
	Sem imersão	Com imersão	Sem imersão	Com imersão	Sem imersão	Com imersão
1	6.90	6.08	10.23	9.66	11.09	11.84
2	4.33	6.09	8.22	7.85	10.92	10.44
3	5.87	5.26	8.27	7.68	12.52	10.63
Média	5.70	5.81	8.91	8.40	11.51	10.97
Desvio padrão	1.05	0.39	0.93	0.89	0.72	0.62

**Tabela 4–40.** Índices de quebra ( $B_g$ ) obtidos para o ensaio CBR nas diferentes energias de compactação

Teste N	E. Normal		E. Intermediária		E. Modificada	
	Com imersão	Sem imersão	Com imersão	Com imersão	Sem imersão	Com imersão
1	13.32	11.55	16.13	17.07	18.86	20.32
2	8.37	10.25	12.96	14.03	17.72	17.30
3	10.69	8.47	14.45	13.41	21.43	17.32
Média	10.79	10.09	14.51	14.84	19.34	18.32
Desvio padrão	2.02	1.26	1.29	1.60	1.55	1.42

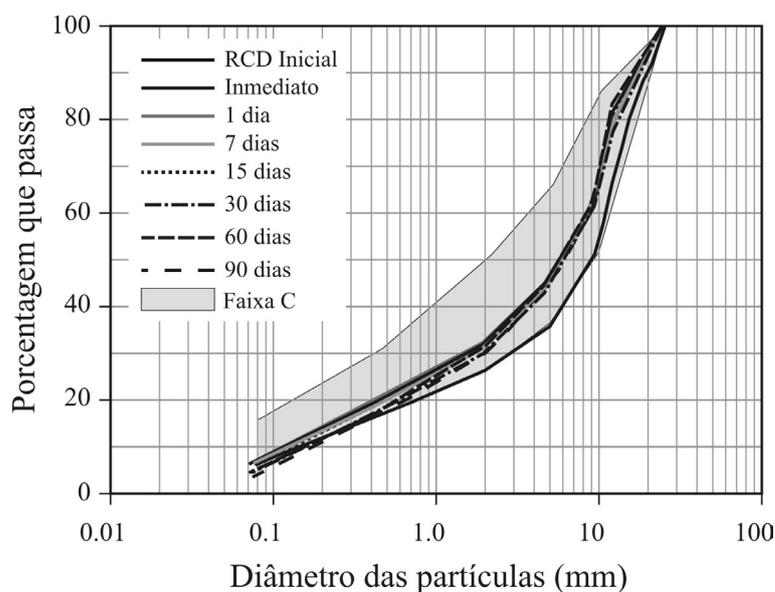
Fazendo uma comparação entre os índices de quebra obtidos nos ensaios de compactação e CBR, se observa que não há diferenças significativas entre eles.

#### 4.20.3 Quebra de grãos após ensaio de módulo de resiliência

Após os ensaios de módulo de resiliência, o material foi pesado e levado para secagem a uma temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ , até peso constante, obteve-se a umidade depois do ensaio e posteriormente uma análise granulométrica por peneiramento foi realizada com o material. Três curvas granulométricas para cada período de cura foram obtidas. A Figura 4-32, apresenta os valores médios obtidos nos diferentes tempos de cura. Vale lembrar que os corpos de prova para o ensaio de módulo foram compactados com a energia intermediária.

Na Figura 4-32 se observa que há uma alteração na distribuição das partículas entre a curva original e as curvas com diferentes períodos de cura. As curvas obtidas entre zero dias, (imediate) e 15 dias são similares. No entanto as curvas de 30, 60 e 90 dias apresentam um

comportamento diferenciado a partir de 2.0 mm, já que a porcentagem retida menor que esse tamanho diminuiu. Foi feita uma análise estatística para verificar se a diferença apresentada na Figura 4-32 era ou não significativa. O valor da função de probabilidade Fischer foi menor que 1, indicando uma boa repetibilidade do ensaio e a semelhança entre os valores, por tanto, se considerou que as diferenças das curvas granulométricas não são estatisticamente significativas.



**Figura 4-32.** Curvas granulométricas obtidas após ensaio de módulo de resiliência

Os índices de quebra médios calculados para os corpos de prova submetidos ao ensaio de módulo resiliente são apresentados na Tabela 4-41. Os valores foram obtidos para a energia de compactação intermediária.

**Tabela 4-41.** Índices de quebra obtidos para o ensaio de módulo de resiliência

Índices de quebra	Imediato	1 dia	7 dias	15 dias	30 dias	60 dias	90 dias
DNER ( $ID_p$ ) %	8	7	7	7	5	7	6
Marsal ( $B_g$ ) %	12	12	12	13	11	13	13

Sobre os dados apresentados na Tabela 4-41 foi feita uma análise de variância com os valores de índice de quebra  $ID_p$  obtidos para as diferentes idades do módulo de resiliência. A análise mostrou que os valores obtidos não pertencem ao mesmo espaço amostral uma vez que as médias são significativamente diferentes. Contudo uma segunda análise de variância foi feita dividindo os dados em dois grupos. O primeiro composto pelos índices de quebra obtidos entre zero (imediato) e 15 dias de cura, com uma média amostral igual a 7% e um desvio padrão de 0.68 mostrou que os dados pertencem ao mesmo espaço amostral. O segundo composto pelos índices de quebra de 30 a 90 dias de cura apresentaram uma média

de 5% e um desvio padrão de 1.17 confirmando que existem pequenas diferenças entre os índices de quebra obtidos para diferentes idades de cura.

Os valores médios de índice de quebra  $ID_p$  calculados após os diferentes ensaios, compactação, CBR e módulo de resiliência para o agregado reciclado de RCD, apresentam semelhanças. Essas semelhanças se observam nas duas metodologias de cálculo empregadas. Uma vez que estes valores são todos parecidos, uma ANOVA foi realizada usando os valores da metodologia do DNER ( $ID_p$ ) os resultados dessa análise são apresentados na Tabela 4-42. A hipótese da análise de variância supõe que todos os dados possuem a mesma média amostral. O resultado da análise estatística mostrou que apesar desses valores serem próximos existem diferenças entre eles e por tanto não pertencem ao mesmo grupo amostral o que significa que cada ensaio afeta de forma diferente a quebra de grãos do agregado de RCD.

**Tabela 4-42.** Resultado da ANOVA para índice de quebra considerando diferentes ensaios

RESUMO

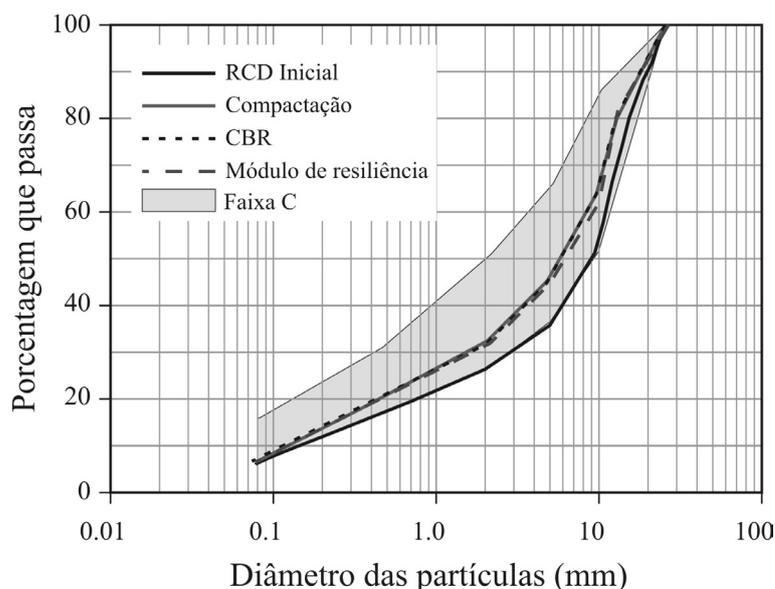
Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância
Compactação	6	47.697	7.949	1.225
CBR	6	51.918	8.653	1.082
Módulo de resiliência	6	41.000	6.833	0.967

ANOVA

Fonte da variação	Soma dos quadrados (SQ)	Graus de liberdade (gl)	Média dos quadrados (MQ)	F	Probabilidade	Valor crítico F
Entre grupos	10.104	2	5.052	4.630	0.027	3.682
Dentro dos grupos	16.368	15	1.091			
Total	26.473	17				

Embora a análise de variância mostre que a quebra de grãos é diferente dependendo do ensaio aplicado sobre o agregado reciclado de RCD, as curvas granulométricas obtidas, mostram que a distribuição dos grãos permanece igual após a compactação, CBR e módulo de resiliência, pelo menos durante as primeiras idades de cura no caso do módulo resiliente, como apresentado na Figura 4-33. Esse comportamento indica que a maior quebra de grãos ocorre durante o processo de compactação ou construção, (Zeghal, 2009; Leite *et al.*, 2011) e não durante a vida do pavimento.

Segundo o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) o índice de quebra admissível para materiais naturais é de 6% (Bernucci *et al.*, 2006). Para o agregado reciclado de RCD utilizado na pesquisa, esse valor foi obtido só quando usada à energia normal.



**Figura 4-33.** Variação das curvas granulométricas após ensaios de compactação, CBR e módulo.

Por outro lado os dados obtidos por Marsal (1975) para agregados de diferentes tipos de rochas com ensaios triaxiais de grande escala e compressões unidimensionais foram muito variáveis e os índices foram dependentes das tensões de cisalhamento aplicadas e da condição de umidade do ensaio. A Tabela 4-43 apresenta alguns valores de  $B_g$  obtidos pelo referido autor. Esses valores embora variáveis e com outras condições de ensaio, são mais próximos aos achados durante a pesquisa.

**Tabela 4-43.** Valores de  $B_g$  encontrados por Marsal (1975) sobre agregados naturais

Nome da rocha	Índices de quebra $B_g$ (%)		
	Compressão Triaxial	Condição do ensaio	Compressão Uniaxial
Conglomerado silicificado de El Infiernillo	15.3	Material seco	27.0
Pedregulho e areia de Pizandarán	6.3	Material seco	7.8
Conglomerado de Malpaso	12.3	Material saturado por fluxo	11.9
Basalto de San Francisco	15.0	Material saturado por fluxo	1.3
Gneis granítico de Mica	23.9	Material saturado por fluxo	17.9
Grava e areia de La Angostura	2.8	Material saturado por contrapressão	7.5

Os elevados índices de quebra das amostras indicam a fragmentação parcial dos grãos durante a compactação. Essa fragmentação pode ser percebida analisando-se as curvas granulométricas das misturas com agregado reciclado de RCD obtidas após a compactação para cada ensaio. A quebra dos grãos resultou numa mudança na granulometria do material, possibilitando o aumento do grau de entrosamento das partículas. O melhor entrosamento dos

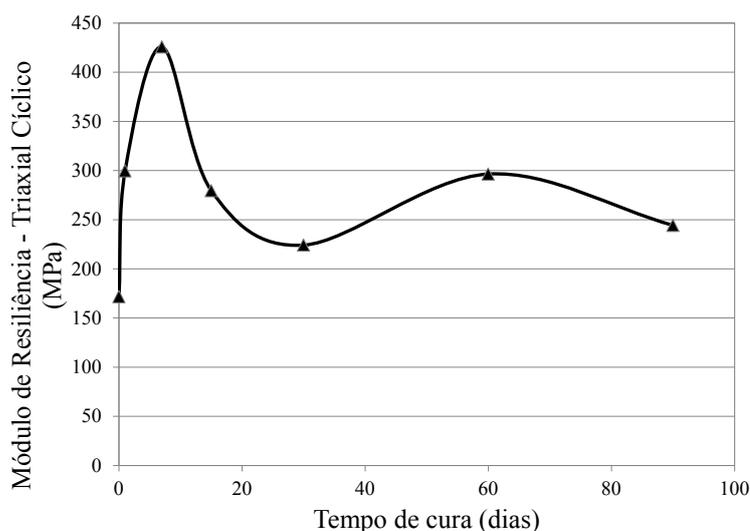
grãos influem na coesão e resistência do material, melhorando as propriedades da camada compactada (Carneiro *et al.*, 2001).

#### 4.21 GANHO DE RESISTÊNCIA POR CIMENTAÇÃO DOS RCD

O ganho de resistência devido a novas cadeias cimentantes foi avaliado por meio de ensaios de resistência à compressão não confinada e ensaios de cisalhamento rápido confinado ( $\sigma_3=34.5$  kPa, constante) e ensaios de módulo de resiliência para diferentes períodos de cura como apresentado no item 3.7.

##### 4.21.1 Ensaio de módulo de resiliência

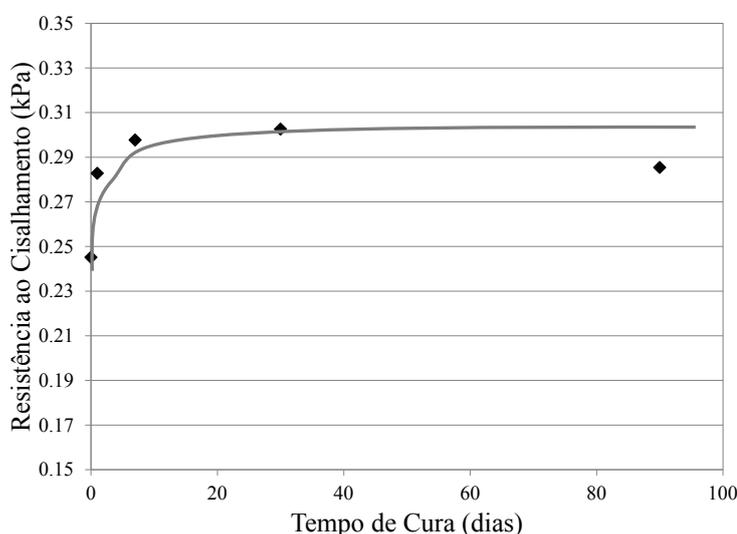
A primeira fase de avaliação do ganho de resistência do agregado reciclado foi feita com os ensaios triaxiais cíclicos. Eles mostraram um incremento no valor de módulo de resiliência ao longo do tempo, sendo maior nos primeiros dias de cura (1 e 7 dias), em 15 dias apresentou-se uma queda nos valores de módulo e após isso os módulos obtidos permaneceram estáveis. A Figura 4-34 apresenta as variações do módulo de resiliência nos diferentes períodos de cura.



**Figura 4-34.** Variação do módulo de resiliência ao longo do tempo

Com o ensaio de cisalhamento rápido, verificou-se a variação da resistência ao cisalhamento do material, adotando como parâmetro de ruptura a máxima tensão desvio do ensaio para uma tensão de confinamento constante e igual a 34.5 kPa. A Figura 4-35, apresenta a variação da resistência ao cisalhamento com o tempo de cura do agregado reciclado de RCD avaliado. Os corpos de prova com tempo de cura a 60 dias não foram testados pois romperam no último ciclo de carregamentos do ensaio de módulo de resiliência.

A Figura 4-35 mostra que existe um ganho de resistência durante os primeiros 30 dias de cura, chegando a 23% com relação ao valor inicial, para 90 dias esse aumento foi só de 16%. Embora o RCD avaliado tenha apresentado um aumento na resistência, esta foi relativamente pequena.



**Figura 4-35.** Variação da resistência ao cisalhamento com o tempo de cura

Os módulos de deformabilidade (D) calculados, também apresentaram um comportamento crescente. Para quantificar o incremento na rigidez do RCD avaliado, os valores de módulo, foram normalizados, dividindo-os por um valor de referência, sendo este o módulo obtido a zero dias de cura. A relação  $D/D_{ref}$  apresentada na Tabela 4-44, mostra claramente que durante os primeiros sete dias o crescimento é acelerado e de 15 a 90 dias o crescimento é pequeno e o valor de D fica quase constante.

**Tabela 4-44.** Normalização dos valores de módulo de deformabilidade (D)

Tempo (dias)	D (MPa)	$D/D_{ref}$	Curva de regressão
	88	1.000	1.000
1	178	2.028	2.029
7	232	2.647	2.604
15	222	2.531	2.606
30	226	2.575	2.606
90	234	2.669	2.606

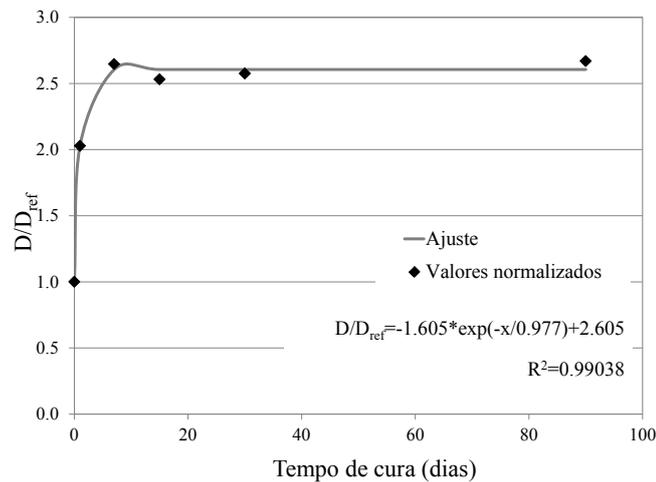
Foi ajustada uma curva de regressão do tipo exponencial decrescente grau um aos dados experimentais tendo sido obtida a seguinte expressão:

$$\frac{D}{D_{ref}} = -1.605 * \exp\left(-\frac{x}{0.977}\right) + 2.605 \quad (4.7)$$

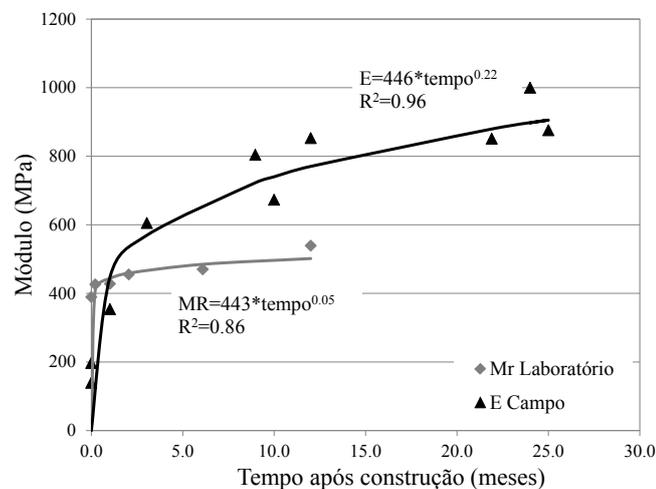
O coeficiente de regressão obtido para o ajuste foi de  $R^2 = 0.99038$ .

O fato de o módulo de deformabilidade aumentar com o tempo de cura (Figura 4-36) indica um aumento na rigidez do agregado reciclado de RCD avaliado. Isso é bastante positivo para um material granular ser empregado como base para pavimentação, já que esse ganho na rigidez distribuirá adequadamente as tensões geradas pelos carregamentos cíclicos do tráfego e evitará a fadiga prematura do revestimento asfáltico.

Arm (2001) estudou o ganho de rigidez com o tempo mediante ensaios de campo e laboratório com agregados reciclados de concreto (ARC) e agregados naturais de granito e gneiss. O estudo mostrou que os agregados reciclados apresentam incremento da rigidez com o tempo; fato que não acontece com os agregados naturais como apresentado na Figura 4-37. Nessa figura pode-se observar que o crescimento da rigidez é elevado durante os primeiros dois meses e logo após esse período a taxa de crescimento diminui. Também se observa que os valores de módulo dos ensaios de campo são superiores aos valores obtidos no laboratório.



**Figura 4-36.** Variação do módulo de deformabilidade normalizado ( $D/D_{ref}$ ) com o tempo de cura



**Figura 4-37.** Incremento na rigidez de um ARC, ensaios de campo e laboratório (Arm, 2001)

#### 4.21.2 Ensaio de compressão não confinada

O ensaio de compressão simples apresentou um ganho de resistência variando de forma crescente com o período de cura dos corpos de prova como observado nas curvas tensão deformação apresentadas anteriormente na Figura 4-24. Foi comprovado que esse aumento não foi provocado pela perda de umidade durante os períodos de cura, pois esta foi verificada após cada ensaio.

As tensões obtidas são apresentadas na coluna resistência à compressão não confinada ou simples (RCS) da Tabela 4-45. Os valores de resistência foram normalizados dividindo-os por um valor de referência sendo este a resistência obtida no ensaio a zero dias. A relação  $RCS/RCS_{ref}$  mostra que à medida que o tempo de cura aumenta, a relação entre as resistências cresce chegando a ser 3 vezes maior em 30 dias. O ensaio a 60 dias não foi feito pois o corpo de prova rompeu-se na desmontagem do ensaio triaxial, e o corpo de prova com 90 dias de cura foi bastante danificado durante o ensaio de módulo de resiliência.

Foi ajustada uma curva de regressão do tipo hiperbólico aos dados experimentais tendo sido obtida a seguinte expressão:

$$\frac{RCS}{RCS_{ref}} = (a * b * x^{(1-c)}) / (1 + b * x^{(1-c)}) \quad 4.8$$

sendo:

$$a = 611.86415$$

$$b = 0.00298$$

$$c = 0.82859$$

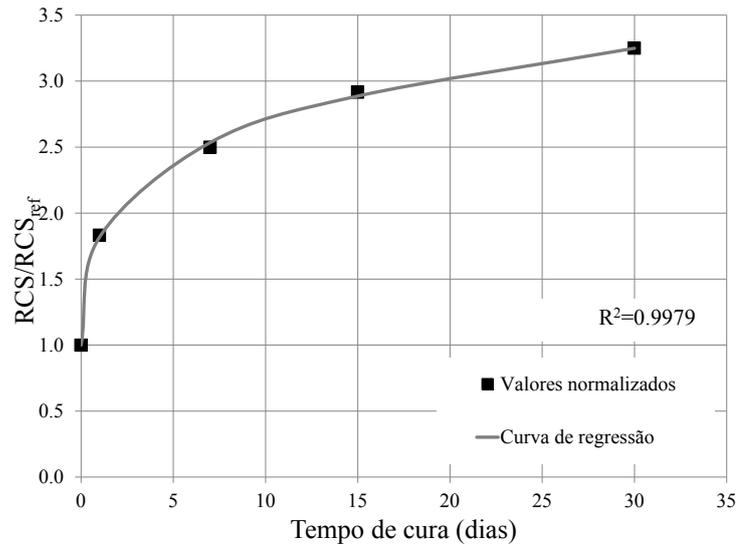
$x$  = tempo de cura em dias

O coeficiente de regressão obtido foi  $R^2=0.9979$

**Tabela 4-45.** Normalização dos valores de resistência à compressão simples

Tempo (dias)	RCS (MPa)	RCS/RCS <sub>ref</sub>	Curva de regressão
0	0.120	1.000	0.000
1	0.220	1.833	1.818
7	0.300	2.500	2.535
15	0.350	2.917	2.887
30	0.390	3.250	3.249

A Figura 4-38 apresenta a variação da resistência à compressão uniaxial ao longo do tempo. Observa-se que a relação entre as resistências do material crescem conforme se incrementa o período de cura.



**Figura 4-38.** Variação da resistência à compressão não confinada em função do tempo de cura

Um resumo com os valores obtidos nos diferentes ensaios feitos sobre o agregado reciclado de RCD analisado nesta pesquisa é apresentado na Tabela 4-46. É possível comparar os resultados obtidos com o resíduo com os valores de referência estabelecidos por diferentes normas as quais incluem agregados naturais e materiais reciclados.

O agregado reciclado de RCD avaliado neste trabalho cumpre todas as condições para ser usado como agregado na construção de bases granulares para pavimentação.

**Tabela 4-46.** Comparação entre valores de referência para agregados usados na pavimentação e o RCD analisado

Propriedades	ASTM D2940-09	NBR 15115/03-EB2103/91	DNER ES 303/97 ES 141/10	PMSP/SP	RCD desta pesquisa
Coefficiente de uniformidade (Cu)	-	≥ 10	-	≥ 10	61
% que passa na peneira N°40	-	10-40%	-	10-30 %	15%
Teor de material passante na malha (0.075mm)	7-15%	10% <sub>gráudo</sub> 15% <sub>miúdo</sub>	-	-	3% <sub>gráudo</sub> 12% <sub>miúdo</sub>
Capacidade de suporte (CBR)	-	60-80%*	> 80%	> 60%	114%
Expansão	≤ 0.5%	≤ 0.5%	≤ 0.5%	≤ 0.5%	0.0%
Materiais indesejáveis	-	3%	-	3%	0.56%
Limite de liquidez (LL)	≤ 25	≤ 25	≤ 25	≤ 25	32%
Índice de plasticidade (IP)	≤ 4	≤ 6	≤ 6	≤ 6	NP
Equivalente de areia (EA)	≥ 35%	≥ 30%	≥ 30%	≥ 30%	≥ 70%
Durabilidade em sulfato de Mg	-	30%	-	30%	6.4% <sub>gráudo</sub> 11.21% <sub>miúdo</sub>
Abrasão Los Angeles	-	≤ 55%	≤ 55%	≤ 55%	

\*CBR ≥ 60% para N ≤ 5x10<sup>6</sup> e CBR ≥ 80% para N > 5x10<sup>8</sup> para energia intermediária

## 5. CONCLUSÕES

Grandes volumes de resíduos de demolição são gerados quando edifícios antigos são derrubados completa ou parcialmente. Os materiais que compõem os RCD também variam conforme o tipo de edificação e os métodos empregados na indústria da construção. Além da preocupação com a geração de RCD, existe o fato de que a exploração indiscriminada dos recursos naturais provocou a escassez desses e uma rápida deterioração do entorno e das jazidas, obrigando a exploração de novas fontes de materiais. No Brasil, a região do Distrito Federal é conhecida nacionalmente pela carência de materiais adequados para a estrutura do pavimento. Esta pesquisa foi desenvolvida com o intuito de informar à comunidade as propriedades dos resíduos de construção e demolição que quando reciclados podem apresentar características físicas e mecânicas iguais e às vezes superiores em relação aos agregados naturais.

O resíduo utilizado nesta pesquisa provém da demolição do estádio de futebol Mané Garrincha. O ensaio de composição do RCD estudado durante esta pesquisa permitiu determinar que 99.44% pertence a materiais classificados na classe A da resolução CONAMA 307/02 (concreto, cimento, argamassa, tijolo, telha). A parcela composta por materiais contaminantes, formada por madeira, plástico e metal, constitui apenas 0.56% da amostra. Segundo a norma NBR 15115/04, materiais indesejáveis mistos não podem ser usados na construção de bases granulares, podendo estar presentes no resíduo de construção e demolição sempre que a quantidade total for menor que 3 %. Assim o resultado obtido para a amostra total se enquadrou no valor especificado pela norma.

Com base nestes resultados é possível afirmar que o RCD obtido da demolição do estádio Mané Garrincha não apresenta uma quantidade significativa de materiais indesejáveis e poderia ser usado como agregado para base, uma vez verificadas as propriedades físicas e mecânicas.

Segundo a composição gravimétrica do material e seguindo a classificação da norma 15116/04, o RCD proveniente do Mané Garrincha classifica-se como agregado reciclado de concreto (ARC).

A curva granulométrica do material permitiu definir a classe textural predominante do agregado reciclado de RCD analisado, sendo esta constituída por 65% de pedregulho fino e 30% de areia. A parcela de finos menores que 0.075 mm para as frações graúdas e miúdas do RCD se enquadram nos valores exigidos pela norma NBR 15116/04.

Os valores de limites de Aterberg obtidos para o agregado reciclado de RCD que passa a peneira 0.425 mm, não atenderam os requisitos da norma NBR EB-2103/91, quanto ao valor de limite de liquidez ( $LL = 32\% > 25\%$ ). No entanto, o material atendeu à condição de equivalente de areia superior a 30%, e portanto o agregado reciclado de RCD avaliado é considerado apto para ser usado na pavimentação rodoviária uma vez que o teor de material argiloso é muito pequeno.

O teor médio de absorção de água obtido para a fração graúda do RCD foi de 7.7 %, valor semelhante aos resultados obtidos por outros pesquisadores no Brasil e considerado alto uma vez que agregados naturais possuem um valor da absorção em torno de 2%. A norma NBR 15116/04, estabelece 7% como valor máximo de absorção para agregados reciclados graúdos, contudo, essa condição é para preparação de concreto sem função estrutural e não estabelece um intervalo de valores quando for usado em pavimentação.

O valor da durabilidade em sulfato de magnésio obtido para o agregado graúdo de RCD foi de 6% e satisfaz o valor requerido na norma NBR EB-2105/91. Para o agregado miúdo não há referencia de valor mínimo ou máximo, mas, foi comprovado que os agregados de materiais cerâmicos vermelhos foram bastante afetados pelo sulfato utilizado. Esses materiais apresentaram desgaste lamelar até a sua desintegração total.

Os valores de desgaste obtidos para o RCD em ambas as graduações cumprem o requerimento da norma NBR EB-2103/91, segundo a qual os materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente devem apresentar uma perda por abrasão Los Angeles inferior a 55%.

Os ensaios de caracterização química e mineralógica permitiram definir a composição microscópica do agregado reciclado de RCD analisado nesta pesquisa. Os óxidos de sílica e cálcio constituíram 59% da fração analisada. Esses mesmos óxidos apareceram nas análises de difração de raios X (DRX) em forma de quartzo e calcita. A precipitação de carbonato de cálcio e com conseqüente ganho de resistência com o tempo poderia acontecer devido à presença desses minerais e do pH superior a 9, valor mínimo necessário para que o carbonato de cálcio possa aparecer. Estes ensaios também permitiram concluir que a fração de tamanho coloidal ( $< 0.075$  mm) não é uma pozolana pura.

Os resultados dos ensaios de compactação com o agregado reciclado de RCD mostraram que a curva de compactação não apresenta o pico tradicional que indica a umidade ótima antes de alcançar o ramo úmido. Para todas as energias Proctor utilizadas, o melhor

comportamento do material foi observado para um teor de umidade em torno de 13%. Para valores de umidade acima de 16%, o agregado reciclado apresentou sinais de saturação. As análises de variância feitas com os dados obtidos do ensaio de compactação mostraram que a energia de compactação altera o comportamento do material alcançando um peso unitário seco máximo maior quando a energia modificada é adotada. Observou-se que a água de compactação melhora a trabalhabilidade do material sem afetar a densidade aparente seca.

Os valores de CBR obtidos para o agregado reciclado de RCD utilizado nesta pesquisa são satisfatórios uma vez que todos eles superaram o limite da norma NBR 15115/04 60%. Os resultados dos CBR com imersão de 96 horas foram superiores aos resultados sem imersão, sendo o aumento de 20% quando foi usada a energia intermediária, e 34% para a energia modificada. Este incremento foi atribuído ao processo de hidratação do material cimentante presente no agregado reciclado de RCD durante a fase de imersão em água.

Os resultados dos ensaios de módulo de resiliência mostraram que o agregado reciclado utilizado durante a pesquisa tem comportamento similar ao de agregados pétreos normalmente utilizados, uma vez que os valores determinados nesta pesquisa variaram entre 200 e 500 MPa. Comprovou-se que o melhor ajuste para os dados de módulo de resiliência obtidos dos ensaios triaxiais cíclicos é o modelo constitutivo Misto.

O ensaio com sete dias de cura mostrou módulos de resiliência entre 300 e 600 MPa indicando um ganho de módulo muito alto em um período de tempo pequeno. Este comportamento foi verificado nos ensaios triaxiais cíclicos feitos com três corpos de prova dessa idade. Apesar disso é recomendável revisar o comportamento do material para este período de cura em particular uma vez que se observou uma queda significativa após este período seguido de um período de ganho e estabilização do módulo de resiliência.

Os módulos de resiliência obtidos com energia de compactação Proctor modificada não tiveram o comportamento esperado. Os valores médios de módulo de resiliência obtidos nos corpos de prova compactados com a energia modificada foram inferiores, embora da ordem de grandeza, quando comparados aos valores obtidos com a energia intermediária. Acredita-se que esta redução esteja relacionada à maior quebra de grãos com a energia modificada.

Com os ensaios de cisalhamento confinado rápido ao final dos ensaios de módulo de resiliência, foi possível calcular módulos de deformabilidade tangente do agregado reciclado de RCD avaliado. Esses módulos mostraram que existe um ganho de rigidez com o aumento

do período de cura. Esse é um resultado interessante já que a rigidez é um parâmetro de grande importância no comportamento mecânico de materiais granulares empregados na construção de bases rodoviárias.

Os ângulos de atrito calculados para os diferentes períodos de cura estão acima de 50°, valores que se enquadram dentro dos reportados na literatura para materiais granulares tipo brita.

A atividade pozolânica com cimento Portland mostrou que a fração analisada de agregado reciclado de RCD tem uma atividade de 52% com relação à mistura. Apesar do material não alcançar os valores exigidos pelas normas ASTM e NBR de 75%, não se deve descartar que a capacidade pozolânicas do RCD analisado influa positivamente na resistência do material de base.

As curvas granulométricas obtidas após compactação Proctor normal, intermediária e modificada, mostraram que existe uma influência direta entre o teor de umidade da compactação e a quebra de grãos do agregado reciclado de RCD sendo que quanto mais seco o material, maior será a quebra de grãos e quanto mais perto da saturação, menor a quebra do material.

A variação da curva granulométrica do material foi evidente após passar por compactação. Observou-se que a maior quebra correspondeu à fração de 12.5 mm onde é evidente a influência da energia de compactação uma vez que a quantidade de material inicialmente retida correspondia a 30%. Quando empregada à energia normal, a porcentagem retida reduziu de 30% para 24%. No caso da energia intermediária a porcentagem retida chegou a 20.5%. Finalmente com o uso da energia modificada a porcentagem retida foi de 15.5%. Os resultados deixam claro que o aumento da energia de compactação afeta a quebra das partículas.

Os índices de quebra calculados foram variáveis dependendo da energia de compactação utilizada. Verificou-se que ocorre a maior quebra quando é utilizada a energia modificada e a menor quebra ocorre quando usada à energia normal.

Os índice de quebra  $ID_p$  e  $B_g$  foram calculados para os ensaios de compactação na energia intermediária, ensaios de CBR e ensaios de módulo de resiliência. Os índice mostraram pequenas diferenças já que as curvas granulométricas ao final dos ensaios não mostraram variações. Isso sugere que a maior quebra de partículas se apresenta durante a compactação.

Os ensaios de cisalhamento confinado rápido e de compressão não confinada feitos sobre os corpos de prova após carregamentos cíclicos mostraram ganhos de resistência. Para o cisalhamento confinado o aumento após 30 dias de cura foi de 23% e para o ensaio de compressão simples o ganho de resistência foi de 250% nesse mesmo período. Os ensaios de CBR também mostraram um aumento na resistência após o período de imersão. Todos esses resultados sugerem que há materiais cimentícios reagindo com a água, provocando um aumento de resistência que pode ser significativo.

Finalmente conclui-se que o agregado reciclado de RCD utilizado nesta pesquisa, apresenta características físicas, químicas e mecânicas que permitem o seu uso como insumo na construção de bases rodoviárias e podem substituir aos materiais convencionais.

### **SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

As análises e resultados obtidos nesta pesquisa estão limitados ao estudo experimental desenvolvido com a fonte de RCD empregada. Com base nelas se recomenda:

- Estudar as características mecânicas com resíduos de outras fontes;
- Realizar ensaios de módulo de resiliência incrementando os ciclos de carga com o intuito de obter a influência sobre o valor do módulo e a deformação permanente associada;
- Uma vez que os resultados de módulo de resiliência para os diferentes períodos de cura apresentaram dispersões, é recomendável continuar estudando este parâmetro com agregados reciclados a fim de compreender melhor, o comportamento deste parâmetro;
- Outras técnicas de compactação em laboratório deveriam ser empregadas usando o mesmo material a fim de avaliar o comportamento do agregado de RCD quando submetido à vibração, por exemplo;
- Em função do aumento no valor de CBR observado após o período de imersão de quatro dias, novas pesquisas considerando corpos de prova com diferentes períodos de inundação deveriam ser avaliadas com o intuito de verificar a capacidade de hidratação dos finos cimentícios presentes nos agregados reciclados.
- Verificar a influência do carregamento cíclico sobre a estabilidade dos agregados.
- Avaliar o comportamento da sucção sobre o RCD a fim de verificar a influência dela na resistência mecânica do material.

## REFERÊNCIAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO T 307-99: Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR EB-2103: Materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente, Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânicas com cimento Portland – índice de atividade pozolânicas com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_NBR 7182: Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1988.

\_\_\_NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da Resistência à Compressão. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_NBR 7219: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_NBR 10004: Resíduos Sólidos Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_NBR 15113: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação, Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_NBR 15115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos, Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos, Rio de Janeiro, 2004.

Angulo, S. C. (2005). Caracterização de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados e a Influência de Suas Características no Comportamento Mecânico de Concretos. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 167 p.

Arm, M. (2001). Self cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial test and field test. Waste Management, 21, pp. 235 – 239.

ASTM – American Society for Testing and Materials. ASTM C88 - 05. Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.

\_\_\_ASTM C618 – 03. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.

\_\_\_ASTM D1883 – 07. Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils.

\_\_\_ASTM D2166 – 06. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil.

\_\_\_ASTM D2419 - 09. Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate.

\_\_\_ASTM D4972 – 01. Standard Test Method for pH of Soils.

Aughenbaugh, N.B., Johnson, R. B., Yoder, E. J. (1966). Degradation of base course aggregates during compaction. Technical Report 166, US Army Cold Regions Research and Engineering Lab.

Bakoss, S. L., Sri Ravindrarajah, R. (1999) Recycled construction and demolition materials for use in roadworks and other local government activities. University of Technology, Sidney. Sidney.

Balzan, D. C., Galletti, F. V., Melo, V. L., Pires, L. M. (2003). Utilização de agregado reciclado de obras de construção civil em pavimentos urbanos. Especificação e obras no município de São Paulo. 12<sup>a</sup> Reunição Anual de Pavimentação. Aracaju.

Bernucci, L. B., Motta, L. M. G., Ceratti, J. A. P. (2006). Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. PETROBRAS: ABEDA, Rio de Janeiro, 504 p.

Bianchini, G., Marrocchino, E., Vaccaro, C. (2005). Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical–mineralogical appraisal. *Waste Management* 25, pp. 149–159.

BIO. (Outubro/Dezembro de 2004). Resíduos da construção civil. *Revista Brasileira de Saneamento e Meio Ambiente*, pp.14-17.

Borges, L. D. (2011). Preparação, Caracterização e Atividade Catalítica de Zeólitas Y Desaluminizadas: Investigação das Interações Fluido-Sólido. Dissertação de Mestrado, Instituto de Química - Laboratório de Catálise, Universidade de Brasília, Brasília-DF.

Brito Filho, J. A. (1999) Cidades versus entulhos. In: Seminário desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil, 2, anais, pp. 56 – 67.

BS - British Standard. Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes . BS 1377-2/90: Classification test.

Carneiro, A. P., Quadros, B. E. C., Oliveira, A. M. V., Schadach de Brum, I. A., Sampaio, T. S., Alberte, E. P. V., Costa, D. B. (2001). Características do entulho e do agregado reciclado. Em: Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção. Projeto entulho bom. Organizado por Cassa J. C. S (*em memória*), Carneiro A. P, Schadach de Brum I. A, pp. 142-188.

Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução N° 307 de 5 de Julho de 2002. Processo N° 02000.001641/2000-15. Assunto: dispõe sobre resíduos da construção civil. Brasília, DF.

Coop MR (1999) The influence of particle breakage and state on the behavior of sand. In: Proceedings of the 2nd international workshop on crushable soils, Yamaguchi University, Japan, July 1999.

Das, M. B. (2006), Principles of Geotechnical Engineering. Thomson, California State University, 5<sup>th</sup> edition, 588p.

Delongui, L., Pinheiro, R. J. B., Pereira, D. S., Piovezan, G. T. A. (2010). Caracterização dos Resíduos da construção civil em Santa Maria (RS) e sua aplicação em pavimentação.

Dias, J. F., Agopyan, V., Bernucci, L. L. B., Moura, E. (2006). Avaliação do módulo de resiliência de misturas solo agregado reciclado cerâmico em função do esqueleto granular do agregado. 13<sup>a</sup> Reunição de Pavimentação Urbana. Maceió.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. DNER-ME 035/98: Agregados – determinação da abrasão Los Angeles.

\_\_\_ DNER-ME 080/94: Solos - análise granulométrica por peneiramento.

\_\_\_ DNER-ME 081/98: Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo.

\_\_\_ DNER-ME 082/94: Solos – determinação do limite de plasticidade.

\_\_\_ DNER-ME 084/95: Agregado miúdo – determinação da densidade real.

\_\_\_ DNER-ME 086/94: Agregado – determinação do índice de forma.

\_\_\_ DNER-ME 194/98: Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.

\_\_\_ DNER-ME 266/97: Agregados – determinação do teor de materiais pulverulentos.

\_\_\_ DNER-ES 303/97: Pavimentação – base estabilizada granulométricamente.

\_\_\_ DNER-ES 141/10: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço.

DNER (1996). Manual de Pavimentação. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico - IPR/DNER, Rio de Janeiro - RJ, 320p.

EPA. Estimating 2003. Building Related Construction and Demolition Materials Amounts. Environmental Protection Agency of United States. 60 pp.

Farias, M. M. (2009). Materiais reciclados para utilização em pavimentação. FAPDF processo nº 2009/00111-1.

Fernandes, C. G. (2004). Caracterização Mecânica de Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição para uso em Pavimentação dos Municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte. Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 109 p.

Forsblad, L. (1981). Vibratory Soil and Rock Fill Compaction, Dynapac Maskin AB, Solna, Sweden.

François, D., Jullien, A. (2009). A framework of analysis for field experiments with alternative materials in road construction. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Centre de Nantes, BP 4129, 44341 Bouguenais cedex, France. Waste Management 29 (2009), pp. 374–382.

Góngora, I. A. G. (2011). Utilização de Geossintéticos como Reforço de Estradas não Pavimentadas: Influência do Tipo de Reforço e do Material de Aterro. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-190/11, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 76 p.

Guimarães, E. M. (1999). Minicurso de mineralogia. XXVII Congresso Brasileiro de Ciências do Solo, Departamento de Mineralogia e Petrologia/IG/UnB, Brasília.

Hardin, B. O. (1985). Crushing of soil particles. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. Vol. 111, N°10: pp. 1177 – 1191.

Hendriks, C. F., Nijkerk, A. A., van Koppen, A. E. (2007). O ciclo da construção. Versão autorizada em Português para Editora Universidade de Brasília.

Hendriks, F., Janssen, G. M. T. (2001). Reuse of construction and demolition waste in the Netherlands for road constructions. Heron, v. 46, n.2, pp. 109 – 117.

Holtz, RD., Kovacs, WD (1981) An introduction to geotechnical engineering. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ.

- Jensen, R.P., Plesha, M.E., Edil, T.B., Bosscher, P.J., Ben Kahla, N. (2001). DEM simulation of particle damage in granular media–structure interfaces. *The International Journal of Geomechanics*, 1, pp. 21 – 39.
- John, V. M. (2000). Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento. Tese (Livre Docência), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 120 p.
- John, V. M. (2001). Aproveitamento de Resíduos Sólidos como Materiais de Construção. Em: Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção. Projeto entulho bom. Organizado por Cassa J. C. S (*em memória*), Carneiro A. P., Schadach de Brum I. A, pp.27 – 45.
- Kartam, N., Al-Mutairi, N., Al-Ghusain, I., Al-Humond, J. (2004). Environmental management of construction and demolition waste in Kuwait. *Waste Management*. 24, pp. 1049 – 1059.
- Kazmierczak, C. (2008). Resíduos de construção e demolição: um problema ou uma oportunidade de negócios?. *Revista mensal do Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia do Rio Grande do Sul*. N°43, pp. 28.
- Kancherla, A. (2004). Resilient Modulus and Permanent Deformation Testing of Unbound Granular Materials. A Thesis by Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of MASTER OF SCIENCE Texas, USA, 159 p.
- Lacasse & Nadim (1996). Uncertainties in characterizing soil properties, Uncertainty in the Geologic Environment, From Theory to Practice Proceeding of Uncertainty '96, Geotechnical Special Publication No. 58.
- Lade, P.V., Yamamuro, J.A., Bopp, P.A. (1996). Significance of particle crushing in granular materials. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122 (4): pp. 309 – 316.
- Lambe, T.W., Whitman, R.V. (2002). *Soil Mechanics* (in Spanish). Limusa, Ciudad de México, D.F., 582 p.
- Lee, K. L. and Farhoomand, I. (1967). Undrained sand behavior in axisymmetric test at high pressures. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*. 122 (2): pp. 120 – 129.
- Leite, F. C., Bernucci, L. L. B., Motta, R. S., Moura, E. M., & Abdou, M. R. (2007). Efeitos da compactação nas propriedades físicas e mecânicas de agregados reciclados de resíduo sólido da construção civil. 38.<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação (38.<sup>a</sup> RAPv) / 12.<sup>o</sup> Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (12.<sup>o</sup> ENACOR) - Manaus/AM - Brasil.
- Leite, F. C., Motta, R. S., Bernucci, L. L. B., Moura, E., Abdou, M. R. (2006). Comparação de valores de índice de suporte de Califórnia de agregados reciclados de resíduo sólido da construção civil. 13.<sup>a</sup> Reunião de Pavimentação Urbana – 13.<sup>a</sup> RPU. Maceió / AL – Brasil.
- Leite, F. C., Motta, R. S., Vasconcelos, H. L., Bernucci, L. L. B. (2011). Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*, 25, 2011, pp. 2972-2979.
- Leite, M. B. (2001). Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos dos Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 270p.

- Lima, J. A. R. (1999). Proposição de Diretrizes para Produção e Normalização de Resíduo de Construção Reciclado e de suas Aplicações em Argamassas e Concretos. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 240p.
- Marsal, R.J. & Resendiz, D. (1975). Earth and Earth-Rock Dams (in Spanish). Limusa, Ciudad de Mexico, Mexico, 546 p.
- Marsal, R. J. (1973) Mechanical properties of rockfill. Embankment-Dam Engineering, vol Casagrande. John Wiley and Sons, New York, pp. 109-200.
- Mitchell, J. K., Soga, K. (2005). Fundamentals of Soil Behavior. John Wiley & Sons, INC., Canada, 3<sup>rd</sup> ed., 577p.
- Motta, L. M. G., Fernandes, C. (2003). Utilização de resíduo sólido da construção civil em pavimentação urbana. 12<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação. Aracaju.
- Motta, R. S. (2005). Estudo Laboratorial de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil para Aplicação em Pavimentação de Baixo Volume de Tráfego. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, 134 p.
- Nataatmadja, A., Tan, Y. L. (2001). Resilient response of recycled concrete road aggregates. Journal of Transportation Engineering, Vol. 127, N°5: pp 450 – 453.
- Oikonomou, N. D. (2005). Recycled concrete aggregates. Concrete & Cement Composites. 27: pp 315 – 318.
- Oliveira, J. C., Rezende, L. R., Guimarães, R. C., Carvalho, J. C. (2005). Variação dos parâmetros de compactação e CBR de agregados reciclados de resíduos da construção civil. 36.<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação RAPv. Curitiba, Brasil.
- Oliveira, J. C. (2007). Indicadores de Potencialidades e Desempenho de Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil em Pavimentos Flexíveis. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-049/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 167 p.
- Palmeira, E. M. (2010). Soluções de baixo custo envolvendo geossintéticos e materiais alternativos em obras geotécnicas e de proteção ambiental. COBRAMSEG 2010: Engenharia Geotécnica para o Desenvolvimento, Inovação e Sustentabilidade. ABMS.
- Park, T. (2003). Application of construction and building debris as base and subbase materials in rigid pavement. Journal of Transportation Engineering. ASCE, 129, (5): pp. 558 – 563.
- Petkovic, G., Engelsen, J. C., Håøya, A. O., Breedveld, G. (2004). Environmental impact from the use of recycled materials in road construction: method for decision-making in Norway. Resources. Conservation and Recycling, 42: pp 249 – 264.
- Pinto, T. P. (1998). Manual de uso dos resíduos de construção reciclados. São Paulo: I&T.
- PMSP/SP ETS – 001/2003. Camadas de Reforço do Subleito, Sub-Base e Base Mista de Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos de Construção Civil. Especificação de Serviço. Prefeitura do Município de São Paulo, Secretaria de Infra-estrutura Urbana, Superintendência de Projetos Viários, Publicado no DOM de 20/03/2003 225.
- Poon, C. S. (1997). Management and recycling of demolition waste in Hong Kong. Waste Management and Research, 15: pp. 561 – 572.

- Poon, C. S., Qiao, X. C., Chan, D. (2006) The cause and influence of self-cementing properties of fine recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base. *Waste Management and Research*, 26: pp. 1166 – 1172.
- Raymond, GP (2000) Track and support for a mine company railroad. *Canadian Geotechnical Journal*, 37: pp. 318 – 332.
- Santos, E. C. G., Montenegro, I. R., Bathurst, R. J., Palmeira, E. M. (2010). Instrumentação e Instalação de Geogrelha de PET em um Muro Envelopado Construído com Resíduo de Construção e Demolição. COBRAMSEG, Engenharia Geotécnica para o Desenvolvimento, Inovação e Sustentabilidade. ABMS.
- Santos, E.C.G. (2011). Avaliação Experimental de Estruturas de Solo Reforçado com Materiais Alternativos. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-069/11, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 211 p.
- Santos, J. (2004). Estabilização de uma Argila Laterítica do Distrito Federal para uso em Rodovias de Baixo Volume de Tráfego. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-127/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 95 p.
- Souza, M. V. R. (2010). Efeitos de Fibras Sintéticas nas Propriedades de Ligantes e Concretos Asfálticos. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-185/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 150 p.
- Svehla, G. (1979) VOGEL'S Text Book of Macro and Semimicro Qualitative Inorganic Analysis, Longman, London and New York, fifth edition, 544 p.
- Tam, W. Y., Wang, K., Tam, C. M. (2008). Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 152: pp. 703 – 714.
- Uzan, J. (1985). Characterization of granular materials. *Transportation Research Record*, 1022: pp. 52 - 55.
- Uzan, J. (1999). Granular material characterization for mechanistic pavement desing. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 125, (2): pp. 108 – 113.
- Vazquez, E. (2001). Aplicación de Nuevos Materiales Reciclados en la Construcción Civil. IV Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil-Materiais Reciclados e suas Aplicações. IBRACON, São Paulo 05 e 06 de Junho de 2001.
- Vesic, A. S., Barksdale, R. D. (1963). On shear strength of sand at very high pressures. *ASTM Spec Tech*. 36: pp. 301 – 305.
- Zeghal, M. (2009). The impact of grain crushing on road performance. *Geotechnical & Geological Engineering*, 27: pp. 549-558.
- Zeghal, M., Edil, T.B. (2002) Soil structure interaction analysis: modelling the interface. *Canadian Geotechnical Journal*. 39, (3): pp. 620 – 628.